أفكار سبع هزت العالم

نيثان سبيلبرج و برايون أندرسون



أفكار سبع هزت العالم

تأليف

نيثان سبيلبرج

برايون أندرسون

ترجمة

أ.د./ أحمد عبد الله السماحي

أ.د./ فتح الله الشيخ



Seven Ideas That Shook the Universe

Nathan Spielberg and
Bryon D. Anderson

أفكار سبع هزت العالم

نيثان سبيلبرج
وبرايون أندرسون

الطبعة الأولى ١٤٣١هـ-٢٠١٠م
رقم إيداع ٢٠١٠/١١٣١٦

كلمات عربية للترجمة والنشر
إن كلمات عربية للترجمة والنشر غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره
وإنما يعبّر الكتاب عن آراء مؤلفه
مكتب رقم ٤، عقار رقم ٢١٩٠، زهراء مدينة نصر، القاهرة
جمهورية مصر العربية
تليفون: ٢٢٧٢٧٤٣١ ٢٠٢+ **فاكس:** ٢٢٧٠٦٣٥١ ٢٠٢+
البريد الإليكتروني: kalimatarabia@kalimatarabia.com
الموقع الإليكتروني: http://www.kalimatarabia.com

سبيلبرج، نيثان.
أفكار سبع هزت العالم / نيثان سبيلبرج، برايون أندرسون . - القاهرة : كلمات عربية للترجمة والنشر، ٢٠١٠.
٣٢٤ص، ١٦,٠×٢٣,٠سم
تدمك: ٩٧٨ ٩٧٧ ٦٢٦٣ ٥٦ ٧
١- الفيزياء
أ- أندرسون، برايون (مؤلف مشارك)
ب- العنوان
٥٢٠

المحتويات

تقديم

سمع الكثير من الناس بنجوم لامعة في مجالات العلوم مثل جاليليو ونيوتن وأينشتاين، لكن ليست لديهم فكرة واضحة عما قاموا به بالفعل. فعلى سبيل المثال، في عالم الإعلانات التليفزيونية القائم على فن البوب، يستخدم اسم أينشتاين — كما هو الحال بالنسبة لشارلي شابلين في تسويق أجهزة الكمبيوتر الشخصية — بعد أن كان قد ساعد في تحرير الطاقة المذهلة والمدمرة أحيانًا لنواة الذرة. ونأمل أن يصحح هذا الكتاب ذلك المفهوم الخاطئ وأمثاله، وأن يجعل الإنجازات العظمى لأينشتاين وغيره من العلماء أكثر وضوحًا.

وقد تبنينا منهجًا وصفيًّا لعدة مفاهيم فيزيائية أساسية كانت قد تطورت عبر السنوات القليلة الماضية، إلى جانب ربطها بالسياق التاريخي والفلسفي التي ظهرت فيه. وينصب التركيز هنا على أصل هذه المفاهيم ومعانيها ودلالتها وحدودها في ضوء فهمنا للطبيعة الفيزيائية للكون الذي نحيا فيه. إن ما قيل عن العلوم التطبيقية والتكنولوجيا قليل نسبيًّا لا يعدو أن يكون مجرد تعليقات فرعية أو توضيحية، كما أنه لا توجد الكثير من المناقشات حول التضمينات التفصيلية للعلم سواء لفائدة أو ضرر المجتمع. ولا يعنينا هنا تأثير العلم والتكنولوجيا على المجتمع أو السياسة أو البيئة.

من بين المفاهيم الرئيسية في هذا الكتاب مع منهج كوبرنيكوس في الفلك، ومنهج نيوتن في الميكانيكا وفكرة الطاقة ومفهوم الإنتروبيا والنظرية النسبية والنظرية الكمية ومبادئ الحفاظ والتماثلات. وقد تم تمثيل المواد والمفاهيم الكمية في المقام الأول من خلال الأشكال والرسوم البيانية. وهناك القليل من المعادلات التي وردت في الكتاب دون إثبات، وأحيانًا يتم تبريرها على أساس بساطتها ومعقوليتها، أو تشابهها مع غيرها.

وقد طورنا هذا الكتاب أصلًا للاستخدام في المناهج الجامعية التي تلبي متطلبات التعليم الجامعي القائم على الفكر الليبرالي. وأحد أهداف هذه المناهج تعريف الطلاب

ببعض التطورات الهامة في العلوم التي أثرت في ثقافتنا الحالية. وأثناء مراجعة الكتاب لطرحه أمام القارئ العادي، قمنا بحذف بعض المناقشات الأكثر تخصصًا، وكذلك الأسئلة المرجعية التي عادةً ما توضع في نهاية كل فصل. كذلك أعدنا كتابة بعض المواد وأضفنا بعض المناقشات حول أوجه الترابط بين الإنجازات العلمية المتنوعة بعضها بعضًا، آخذين في الاعتبار كلًا من الفلسفة والأدب. مع ذلك يظل تركيزنا الأساسي على المضمون الفيزيائي للأفكار موضوع المناقشة. ونعتقد أن المرء لا يستطيع أن يفهم تضمينات أو استخدامات الفيزياء في مجالات أخرى للفكر البشري دون فهم صحيح للفيزياء. ونأمل، مثلًا، أن يدرك قارئ هذا الكتاب أن النظرية النسبية لأينشتاين لا تعني أن كل شيء نسبي، كما هو الانطباع العام لدى معظم الناس.

كما هو الحال في هذا النوع من الكتب، من الصعب أن نقر بكل ما قدم الزملاء وبالمصادر والكتب التي لجأنا إليها، خاصة أولئك الذين ورد ذكرهم في تعليقات الأشكال. ونود هنا أن نقر على وجه الخصوص بفضل التعليقات والمساعدة التي حصلنا عليها من الأساتذة: دافيد أليندر، وويلبرت هوبين، وجون واتسون، وبوبي سميث من جامعة كِنت بولاية أوهايو، وكارول دونلي من كلية هيرام، وروبرت ريسنيك من معهد رينسيلر بوليتكنيك، وديوي ديكسترا من جامعة بويزي بولاية إيداهو، وروناالد براون من جامعة ولاية نيويورك في أوسويجو، وجاك سولز من جامعة كليفلاند بولاية أوهايو، ونلسون دولر من جامعة تكساس إيه آند إم، وثاد إنجليرت من جامعة وايومينج، ويوجين ميرزباتشر من جامعة شمال كارولينا. كما نقدر أيضًا مساعدة ديفيد سوبيل وروبرت ماك كونين، المحررين في دار جون ويلي وأبناؤه للنشر، ومجموعة العاملين بها. وقد أخذت جوان أندرسون على عاتقها مهمة إعداد مخطوطة الكتاب، ونحن ممتنين لها. كما نقدّر لكل من أليس سبيلبرج وويليام أمبروجيو إعداد النسخة الأولى من الكتاب الأصلي. وبالطبع فإن طلابنا كانوا بمثابة الدافع وراء إعداد هذه المادة في المقام الأول. وكالعادة دائمًا فإن أخطاء الحذف والتقصير مسئوليتنا.

إن سبيلبرج

بي دي أندرسون

الفصل الأول

مقدمة

المادة والحركة: الثورة العلمية المستمرة



سديم رأس الفرس في برج الجوزاء
(الصورة مهداة من مراصد جبل ويلسون وبالومار).

ثمة سحر خاص يكتنف الثورات والأفكار الثورية. وغالبًا ما يعتقد المشاركون في الثورات السياسية أنه باستبعاد النظام القائم، فإنهم يتحررون من الأغلال ببسالة، ويحققون قدرًا من الحرية الجديدة بشجاعة. وتحمل الثورات العلمية بين طياتها

سحرًا فكريًّا، وتمثل الإطاحة بطريقة فهم محددة للعالم الفيزيائي الذي نعيش فيه، كما أن التحرر من الأغلال قد تداخل بشكل ما مع المنظور السليم للعالم المادي. وربما يترتب على الثورات العلمية تأثيرات عميقة ودائمة وعادةً غير متوقعة على كيفية رؤيتنا وتعاملنا مع العالم المحيط بنا، وذلك على نحو يفوق الثورات السياسية. ووفقًا لهذا المفهوم، يمكن النظر إلى الأفكار الثورية العلمية على أنها تهز العالم الفكري. يعرض هذا الكتاب مقدمة لسبعة من أهم الأفكار وأكثرها ثورية في علوم الفيزياء.

الثورات والعلم

من الممكن اعتبار المشاركين الأفراد في تطوير وتوضيح التفكير العلمي على مدى ٥٠٠ عام مضت ضمن أعظم الثوريين وأكثرهم نجاحًا في العالم. لم تقع الثورات التي قادها هؤلاء الأفراد بين ليلة وضحاها، بل إنها تطلبت في حالات كثيرة عقودًا إن لم يكن قرونًا لاستكمالها. ومع ذلك، فقد أدت أعمالهم إلى ظهور أفكار ومفاهيم جديدة عن العالم والكون ومكانة البشر فيهما. وقد أثر نجاحهم بعمق على أساليب التفكير، كما عزز الاعتقاد بأن العقل والمنطقية أدوات فعالة لفهم الكون.

وفعليًّا تقبلت كل الفلسفات الاجتماعية والسياسية مفاهيم علمية محددة وتفاعلت معها، مثل: الطاقة، والنسبية والمطلقية، والنظام والاضطراب، والحتمية والشك. وكثيرًا ما استُخدم العلم — سواء أكان ذلك مبررًا أم لا — لتأييد أو دحض المفاهيم المختلفة للفكر الديني، واعتبر الكثيرون أن «المنهج العلمي» طريقة للتعامل مع كل مشكلات البشر تقريبًا. ويصف هذا الكتاب تطور الأفكار الفيزيائية الكبرى التي ساهمت في تشكيل النظرة الحديثة للكون وفي القبول العام للمنهج العلمي.

تعد الفيزياء أقدم العلوم وأكثرها تطورًا، كما أنها نموذج لجميع العلوم الأخرى. تختص الفيزياء بمناقشة التساؤلات الأساسية المتعلقة بطبيعة الكون الفيزيائي. فهي تطرح بعض الأسئلة، مثل ما أصل الكون؟ كيف نشأ الكون الفيزيائي وإلى أين يتجه؟ ما لبنات البناء الأساسية للمادة؟ وما القوى الأساسية في الطبيعة؟ ولأن الفيزياء تهتم بدراسة هذه الأسئلة وغيرها من الأسئلة الأساسية، فإنها تقدم الأسس التي تقوم عليها جميع العلوم الفيزيائية، وفي الواقع جميع العلوم البيولوجية أيضًا. ويقوم الوصف الأساسي لكل الأنظمة الفيزيائية على قوانين الكون الفيزيائي، التي يشار إليها عادةً باسم «قوانين الفيزياء».

ولأن الفيزياء هي أكثر العلوم أساسية، فإن أي استنتاج علمي يناقض مبادئ الفيزياء لا يمكن قبوله على أنه صحيح تمامًا. فمثلًا بعض الانتقادات العلمية التي وُجهت إلى أفكار تشارلز داروين عن التطور البيولوجي في البداية كانت قائمة على فرع من الفيزياء معروف باسم الديناميكا الحرارية (الثرموديناميكا). فقد بينت الحسابات الأولية لطول الزمن الذي ربما تكون قد استغرقته الأرض لتبرد من الحالة المنصهرة حتى تصل إلى درجة الحرارة الحالية أنه لم يتوفر الزمن الكافي لحدوث عمليات التطورية الضرورية (شعر داروين نفسه بالانزعاج كثيرًا عندما عرف ذلك). ومع إدراك أن النشاط الإشعاعي من الممكن أن يمد الأرض بحرارة داخلية إضافية في أواخر القرن التاسع عشر فقط، صار من الممكن إثبات أن الأرض ربما انخفضت حرارتها ببطء أتاح الوقت اللازم لحدوث عمليات التطور وفقًا لمفاهيم داروين. والآن تقدم تقنيات التأريخ باستخدام النشاط الإشعاعي — والمشتقة من الفيزياء النووية — دعمًا إضافيًّا لهذه الفكرة.

وفي الواقع يقال إن كل العلم يتكون من جزأين؛ هماالفيزياء وباقي العلوم الأخرى التي لا تعدو أن تكون أشبه بمطاردة الفراشات.* وتؤكد هذه المبالغة على جانبين من الجوانب المتعلقة بالمساعي العلمية: جمع وتصنيف المادة الوصفية، وفهم أسباب الظواهر المتنوعة في ضوء المفاهيم الأساسية. وتتضمن كل العلوم، ومنها الفيزياء، هاتين السمتين. ومع ذلك تختص الفيزياء عن غيرها من العلوم الأخرى بأن التقدم الحقيقي لا يحدث إلا عند التوصل إلى فهم للظواهر.

لقد انتقينا المفاهيم الفيزيائية المهمة المطروحة في هذا الكتاب نظرًا لطبيعتها الأساسية والجاذبية المتأصلة فيها. وهي تمثل نقاط تحول كبرى في تقدم علم الفيزياء. وسنقدم هذه المفاهيم باستخدام مصطلحات جامعة وتمهيدية على أمل أن يكتسب القارئ بعض الفهم لموضوعاتها الرئيسية، وكيفية تطورها، إضافة إلى ما تتضمنه من تأثير على فهمنا للكون. وسيتعلم القارئ كذلك بعض الأمور عن المصطلحات المستخدمة في الفيزياء. أما المناقشات المحددة حول المنهج العلمي وفلسفة العلوم، فستكون بالأحرى مناقشات سطحية غير متعمقة، على الرغم من أن مثل هذه الاهتمامات مهمة في إثبات صحة المفاهيم العلمية. علاوة على ذلك، ثمة قدر

*قال رذرفورد قولًا شبيهًا: «العلم الحقيقي هو الفيزياء، وما عداه جمع طوابع»، على الرغم من أنه حصل بعد ذلك على جائزة نوبل في الكيمياء. (المترجمان)

ضئيل نسبيًّا من المناقشات المعنية بالثمار العملية أو النتائج المترتبة على المشاريع العلمية، على الرغم من أن تلك النتائج — بدءًا من اختراع ألعاب الفيديو والآلات الحاسبة مرورًا بالحفاظ على الحياة وإطالتها ووصولاً إلى الرعب الذي تثيره الحروب النووية — هي التي تحفز الاهتمام البالغ بالعلوم الفيزيائية في كل أنحاء العالم الحديث.

الموضوعات المهيمنة في علم الفيزياء

هناك موضوعان رئيسيان يغلبان على تطور الفيزياء: (١) المادة والحركة، (٢) البحث عن الترتيب والنسق. يمثل الموضوع الأول محاولة فهم؛ أما الثاني، فيمثل محاولة تصنيف.

يبحث علم الفيزياء في المادة والحركة. وأحيانًا ينصب التركيز على واحدة منهما دون الأخرى والعكس، إلا أنه من المهم أيضًا دراسة التفاعل بين الاثنين. وفي الحقيقة، لا يتضح التمييز بين المادة والحركة في النظريات الحديثة للنسبية وميكانيكا الكم. وتعتبر المادة في بنيتها الدقيقة النهائية في حالة حركة دائمًا. حتى في ظل الظروف التي تتوقف فيها مسببات الحركة عن العمل، فإن المادة تظل في حالة حركة تسمى حركة نقطة الصفر أو طاقة نقطة الصفر.

لا تهتم الفيزياء بفكرة «العقل فوق المادة» — أي استخدام العقل للتحكم في المادة والحركة — وإنما تهتم بدلًا من ذلك بفهم المادة والحركة. وأحيانًا يشغل الفيزيائيون أنفسهم بـ«الطبيعة الحقيقية للواقع»، إلا أن مثل هذه الاعتبارات تُترك غالبًا للفلاسفة. وهناك حدود للفهم العلمي، وأحد أهداف هذا الكتاب توضيح بعض هذه الحدود، على الأقل عند هذه النقطة من تطور العلوم.

وكفرع من المعرفة البشرية، يهتم العلم بتصنيف وتقسيم الأشياء والظواهر. وهو يبحث عن العلاقات بين الأشياء والظواهر، ويسعى دائمًا إلى وصف هذه العلاقات باستخدام التمثيل الهندسي؛ سواء في صورة رسوم بيانية أو مخططات شجرية أو خرائط تدفق أو غير ذلك. وغالبًا ما تلاحظ أوجه التناظر والتكرار في هذه العلاقات، وذلك حتى يتركز الاهتمام على العلاقات بقدر تركيزه على الأشياء أو الظواهر موضوع هذه العلاقات. يتوق العلم دائمًا إلى إيجاد أبسط العلاقات العامة وأكثرها عالمية. ويؤدي ذلك بالطبع إلى التوصل إلى نماذج ونظريات تبسط وتمثل وتوسع نطاق العلاقات المختلفة.

فمثلًا، يقال أحيانًا إن الذرة تشبه نموذجًا مصغرًا من المجموعة الشمسية تمثل النواة فيها الشمس، بينما تمثل الإلكترونات الكواكب. ووفقًا لنموذج المجموعة الشمسية ذلك، يمكن الإشارة إلى احتمال دوران النواة والإلكترونيات بالطريقة نفسها التي يدور بها نظيراتها في المجموعة الشمسية. وبذا، يصبح من الممكن استكشاف المدى الذي يصل إليه تطور العلاقات نفسها في الذرة كما في المجموعة الشمسية. تؤدي المجموعة الشمسية دور نموذج الذرة، وإن كان نموذجًا غير مكتمل، وبذلك، فإنها تساهم في فهمنا للذرة.

التطور المستمر للمعرفة العلمية: الأفكار السبع

تقوم المعرفة العلمية على التجارب التي يقوم بها البشر، حيث لا تتحقق في لحظة مثيرة للدهشة. وسيكون هناك دائمًا المزيد من التجارب التي تجرى لزيادة كمية المعرفة العلمية المتاحة. وقد تكون النتيجة التراكمية لهذه التجارب فهم أنساق جديدة في مخزون المعرفة العلمية أو الإقرار بأن الأنساق التي اعتبرت شاملة في يوم ما لم تكن كذلك في نهاية الأمر. وقد نستغني عن الأفكار التي كانت مؤكدة سابقًا، أو نعدّلها بقدر كبير نتيجة اكتشاف أنساق جديدة أو مختلفة للظواهر. إن اللغط والقلق والمراجعة والتحديث الذي يعتري المفاهيم العلمية بصورة دائمة هو ما أدى إلى تطور الأفكار السبعة الرئيسية في الفيزياء، والتي سنناقشها في هذا الكتاب. وسوف يوضح الاستعراض الموجز لهذه الأفكار الموضوعات الرئيسية الخاصة بها.

١- الأرض ليست مركز الكون: علم الفلك الكوبرنيكي

منذ ٢٠٠٠ عام تقريبًا، بدءًا من زمن أرسطو إلى ما بعد رحلات كولومبوس إلى العالم الجديد بقليل، كان يعتقد أن الأرض تقع في مركز الكون، حرفيًّا ومجازيًّا، في الواقع وفي المفهوم اللاهوتي. وتتضمن أول الثورات العلمية الرئيسية التي سنناقشها إحياء وترسيخ وتوسيع نطاق فكرة مناقضة لهذا الاعتقاد؛ وهي أن الأرض ليست سوى كوكب صغير ضمن كواكب عديدة تدور حول الشمس التي هي الأخرى ليست سوى نجم واحد بعيد عن مركز مجرة محددة (ثمة العديد منها) في كون شاسع لا حد له. ربما كانت هذه الثورة العلمية الأولى هي الأشد وطأة، ليس فقط بسبب ما لاقته من رد فعل، داخل وخارج نطاق العالم الفكري، بل كذلك لأنها تضمنت

دافعًا وراء ظهور أفكار ثورية أخرى. ولم ينقح كوبرنيكوس علم الفلك فقط، بل إنه استفاد من الأفكار الخاصة بالحركة النسبية ومن بساطة النظريات العلمية.

٢- الكون آلية تعمل وفقًا لقواعد راسخة: الفيزياء النيوتونية

تخضع كل الأشياء الموجودة في الكون لقوانين الفيزياء. فإسحاق نيوتن — في عرضه لقوانين الحركة وقانون الجاذبية الكونية — نجح في توضيح الأساس الفيزيائي الراسخ والمضمّن في الأفكار الخاصة بعلم الفلك الكوبرنيكي. وقد بين نيوتن ومن سار على دربه من العلماء أن هذه القوانين والقوانين المماثلة الأخرى تشكل أساس عمل الكون المادي بأكمله، سواء بوجه عام أو بوجه أدق تفصيلاً. بالإضافة إلى ذلك تتسم هذه القوانين بأنها شاملة ومفهومة. وكما سيتضح من العرض التفصيلي الوارد في الفصل الثالث، فإن هذه الفكرة الثانية — والتي تربط السبب بالنتيجة (السببية)، بعيدًا عن تحكمها في الظواهر الطبيعية والاصطناعية وفي الآليات والوسائل — لها تأثيرات بعيدة المدى على المذهبين المتناقضتين؛ الحتمية (القدرية) وحرية الإرادة.

٣- الطاقة تحرك الآلية: مفهوم الطاقة

على الرغم من طبيعتها الشمولية، إلا أن الفيزياء النيوتونية — علم الميكانيكا — لا تقدم وصفًا مقبولًا تمامًا للكون؛ فنحن في حاجة إلى معرفة السبب وراء الحفاظ على سير هذه الآلية الرائعة. اعتبر القدماء أن الآلهة هي التي تحرك كل شيء في هذا الكون. أما الفكرة الثالثة، فتشير إلى أن الطاقة هي التي تحافظ على سير الكون وتظهر الطاقة في صور مختلفة يمكن تحويل أي منها إلى الأخرى. وفي الواقع، تعبر أزمة الطاقة التي تحدث بين الحين والآخر والتي تسبب حالة من الذعر عن وجود عجز في أحد أشكال الطاقة هذه وعن المشكلات الناتجة من الحاجة إلى تحويل الطاقة من صورة إلى أخرى. ويمكن استيعاب ماهية الطاقة من خلال مقارنتها بالنقود. فالنقود وسيلة للتبادل والتفاعل بين البشر. بالمثل كثيرًا ما يتم تبادل الطاقة في التفاعلات التي تحدث بين الأجسام المختلفة في الكون. وكما أن هناك عادةً حدًّا لكمية النقود المتاحة، فهناك حد لكمية الطاقة المتاحة أيضًا. ويعبر عن هذا الحد بمبدأ الحفاظ على الطاقة، الذي يحكم توزيع الطاقة في صورها المختلفة. (ينص مبدأ الحفاظ على الطاقة على أن «الطاقة لا تستحدث ولا تفنى، ولكنها تتحول من صورة إلى أخرى.») وكما سنناقش بالتفصيل في الفصل الثامن، هناك كميات أخرى

غير الطاقة يتم تبادلها أثناء التفاعلات بين الأجسام المادية، وتخضع كذلك لمبادئ الحفاظ على الطاقة.

٤- الآلية تتحرك في اتجاه محدد: الإنتروبيا والاحتمالية

على الرغم من إمكانية تحويل الطاقة من صورة إلى أخرى بدون أي فقد فيها، فإن هناك قيودًا على درجة القابلية للتحول. وإحدى تبعات هذه القيود المفروضة على إمكانية تحول الطاقة من صورة إلى أخرى تحديد نظام مسلسل زمنيًّا وشامل للأحداث الماضية في الكون. ويتم التحكم في القيود المفروضة على قابلية التحويل من خلال القواعد نفسها التي تحكم عملية إلقاء النرد (زهر الطاولة) في لعبة مقامرة نزيهة، وهو ما يعرف باسم قوانين الصدفة (علم الإحصاء). ويشير ذلك إلى إمكانية تعديل الثورة المتأصلة في فكرة الحتمية على الأقل بواسطة ثورة مضادة. وتدل هذه الاعتبارات على أن الحرارة، إحدى الصور المكنة للطاقة، لا بد أن يُنظر إليها على أنها صورة «متناقصة» من صور الطاقة، وهو استنتاج يتحتم تذكره بصفة خاصة في الأوقات التي تثار فيها مشاكل الطاقة الخطيرة.

٥- الحقائق نسبية، لكن القانون مطلق: النسبية

تمتد جذور مفاهيم نظرية النسبية إلى بعض الخلافات التي أثيرت أثناء تطور علم الفلك الكوبرنيكي. ومع أن ألبرت أينشتاين يرتبط الآن عالميًّا بنظرية النسبية، فإنه لم يبتدع الفكرة التي تقول إن معظم ما نراه يعتمد على وجهة نظرنا (أو بتعبير أكثر دقة على إطارنا المرجعي). وفي الواقع طور أينشتاين نظريته في الأصل ليكتشف تلك الأشياء الثابتة (المطلقة وغير المتغيرة)، وليس الأشياء النسبية. وكان معنيًّا بالأشياء العالمية التي تتشابه من جميع وجهات النظر. وبالرغم من ذلك، وبدءًا من الفكرة التي اعتبرت ثورية حينئذٍ والتي تقول إن سرعة الضوء لا بد وأن تكون ثابتة بغض النظر عن الإطار المرجعي للمُشاهد، فإنه تمكن من إثبات أن كثيرًا من الأشياء التي كان يُعتقد أنها غير متغيرة أو مطلقة، مثل المكان والزمان، هي نسبية. أعاد أينشتاين اختبار المفاهيم الأساسية للزمان والمكان، وأوضح أن هذه المفاهيم متداخلة إلى حد بعيد. وقد كان عمل أينشتاين في الواقع جزءًا من إعادة الاختبار العام للمفاهيم الأساسية والافتراضات السائدة في ذلك الوقت في كل من الفيزياء والرياضيات، كما

أنه بيَّن للفيزيائيين أنهم لا يستطيعون إهمال الاعتبارات الفلسفية والميتافيزيقية كلية.

٦- لا يمكن معرفة أو التنبؤ بجميع الأشياء: نظرية الكم وحدود السببية

نشأت هذه الفكرة — التي ترفض مبدأ الحتمية المطلق والذي ظهر نتيجة الفيزياء النيوتونية — دون أن تشوبها محاولة التوصل إلى صورة أدق للبنية تحت الميكروسكوبية للذرة. وفي بداية القرن العشرين، اكتشف العلماء أن الذرات تتكون من الإلكترونات والأنوية، حيث أُجريت محاولات للحصول على معلومات أكثر دقة حول حركة الإلكترونات. ومع ذلك، لا يمكن الوصول إلى هذه الصورة الأدق، ومن الضروري أن نمعن التفكير فيما يمكن معرفته مادًا، وكذلك في الطبيعة الفعلية للواقع. وعلى الرغم من أنه لا يمكننا الحصول على صورة دقيقة للغاية للبنية الأساسية للذرة، فإن لدينا بالفعل صورة واضحة إلى حد بعيد. وبذا، يصبح من الضروري استخدام طرق جديدة لوصف الذرات والأنوية: يمكن أن تتواجد الأنظمة فقط في «حالات كمية» معينة، ويمكن فهم الكميات المقيسة فقط في ضوء الاحتمالات. وربما تتيح هذه الصورة الجديدة وغير الواضحة إمكانية الفهم التفصيلي للكيمياء، وإنتاج تلك الأشياء التي تثير الدهشة، مثل الترانزستورات، والليزر، وأفران الميكروويف، واتصالات الرادار، والسبائك فائقة القوة، والمضادات الحيوية، وغيرها.

٧- الأشياء لا تتغير مطلقًا: مبادئ الحفاظ والتماثلات

ما زالت الفكرة الثورية السابعة — التي تتعارض مع الفكرة العامة القائلة إن كل الأشياء لا بد وأن تتغير — تمر بمرحلة التطور، ولم تتضح بعد النتائج المترتبة عليها كاملةً. مع ذلك تنص هذه الفكرة على أن بعض الكميات «محفوظة»، بمعنى أنها تظل ثابتة ودون تغيير. وعلى الرغم من القيود التي تفرضها الفكرة السابقة، فإن الفيزياء تواصل استكشاف البنية النهائية للمادة، والتي تتضمن كميات هائلة من الطاقة. وربما تكون وحدات البناء الأساسية وغير المحددة للطبيعة معروفة الآن، وربما تتضمن هذه الوحدات جسيمات مثل الكواركات التي تتكون منها البروتونات والنيوترونات. وهنا يثار تساؤل بديهي عن القواعد التي تحكم البنية الأساسية، وعما تكشف عنه هذه القواعد من حقائق بشأن طبيعة العالم المادي. وكما أشرنا من قبل، فإن هناك كميات أخرى محفوظة إلى جانب الطاقة تؤثر في التفاعلات التي

تحدث بين المكونات الأساسية للمادة، وذلك وفقًا لقواعد محددة أو لمبادئ الحفظ. ورياضيًّا تمثل كل قاعدة من تلك القواعد تماثلًا معينًا. وقد نتج كل هذا التقدم الحديث في تحديد وحدات بناء المادة مباشرةً من إدراك العلاقة الوطيدة بين قوانين الحفاظ والتماثلات في عالمنا الفيزيائي. وحيث إن تلك الفكرة ما زالت قيد التطوير، فإن أسئلة أخرى تطرح نفسها: هل يمكن فصل المادة والطاقة عن الزمكان (الزمان والمكان) اللذين تشاهدان فيه؟ ما طبيعة الزمكان، وكيف يؤثر «شكله» و«تماثله» على مبادئ الحفاظ المتنوعة التي تبدو فاعلة على مستوى العالم أجمع؟ وبالنسبة لهذا الأمر، هل هناك بالفعل بنية أساسية أو مبدأ توحيد أساسي في العالم المادي؟ ربما لن نعرف الإجابة النهائية أبدًا، لكن الفيزيائيين يسعون باستمرار لإيجاد نظام ضمن الشَواش الذي يقع خارج حدود فهمنا.

وليس هناك من سبب يدعو لافتراض أن هذه الأفكار الثورية السبع هي الوحيدة التي ستتطور في الفيزياء. ومن الممكن مقارنة الفيزياء بسيمفونية غير مكتملة، بمعنى أن هناك إمكانية لظهور حركات جديدة. وسوف تستخدم هذه الحركات الجديدة موضوعات متكررة وموضوعات جديدة، وكذلك الموضوعات التي ستنشأ من الحركات السابقة. على سبيل المثال، لا يختلف البحث عن تماثلات في أكثر المجالات تقدمًا في فيزياء الجسيمات الأولية اختلافًا كبيرًا عن البحث عن الكمال في العالم المادي الذي ميز العلم الإغريقي. وبسبب كل من الموضوعات المتكررة والجديدة والتفاعل بينها، يمكن وصف الفيزياء بأنها «جميلة»، تمامًا مثلما نصف السيمفونيات والأعمال الفنية بأنها جميلة من الناحية الفكرية. (وكثيرًا ما تكون البساطة الشديدة التي تتميز بها الأفكار الفيزيائية سر هذا الجمال.)

وهناك طرق عديدة يمكن من خلالها تقديم المقطوعات السيمفونية إلى الجمهور. فأحيانًا يتم عزف حركة واحدة أو حركتين فقط، أو يعاد ترتيب القطعة الموسيقية لتختلف عن الترتيب الأصلي. وفي هذا الكتاب، سوف نتناول الحركات الخاصة بسيمفونية الأفكار السبع وفقًا للترتيب الذي تطورت به خلال فترة امتدت من مائتي وخمسون إلى ثلاثة آلاف سنة. وعلى الرغم من أن هذا الترتيب الزمني ليس الأفضل بالضرورة من وجهة نظر التطور المنطقي من المبادئ الأساسية، فإنه مع ذلك يؤدي إلى تيسير فهم الأفكار وإلى التعرف على السياق الذي تطورت فيه بصورة أفضل. كذلك، فإنه يتيح إمكانية التبصر بالتطور المستمر في علم الفيزياء على مستوى أعمق.

يتفق الترتيب التاريخي إلى حد ما مع الترتيب الذي يتناقص به حجم الأشياء موضوع الدراسة (تأتي النجوم والكواكب في المقدمة، بينما تعد الجسيمات تحت الذرية وتحت النووية الأكثر حداثة.) ويتماشى تناقص حجم الأشياء موضوع الدراسة، تماشيًا متناقضًا للغاية مع زيادة شدة القوى التي تؤثر في تلك الأشياء، بدءًا من قوى الجاذبية الضعيفة جدًّا التي تعمل في الكون على مقياس ضخم، وحتى القوة فائقة الشدة التي تربط الكواركات معًا (مكونات النوويات والميزونات). كذلك من المفارقات، أنه كلما زادت دراسة السمات الأساسية والرئيسية للمادة والطاقة، أصبح النقاش أكثر تجريدًا.

فيزياء بدون رياضيات؟

يتسم عرض هذا الكتاب بأنه غير رياضي. فالقارئ الذي لديه القليل من الخبرة في علم الرياضيات، سوف يتمكن من متابعة التطور التصوري. ومع ذلك فالفيزياء علم كمي إلى حد بعيد يدين بنجاحه لإمكانية تطبيق الرياضيات على مادة موضوعه. ويعتمد نجاح أو فشل النظريات الفيزيائية على مدى دعم العمليات الحسابية التفصيلية لهذه النظريات، ولا يمكن للمناقشات الجيدة للمفاهيم الفيزيائية أن تتجاهل علم الرياضيات. ومع ذلك، فمن الممكن تقليص الاعتماد على الرياضيات عند طرح العلوم أمام عموم الناس، كما هو الحال بالنسبة لمجلتي ساينتيفيك أميريكان Scientific American وإنديفور Endeavor. ومن الممكن توصيل المفاهيم والمناهج الأساسية في الفيزياء بنجاح معقول باستخدام أدنى قدر من الرياضيات. وفي النهاية، يبدو أن الطبيعة تتبع عددًا قليلًا من القواعد التي تثير الدهشة ببساطتها. ويمكن وصف هذه القواعد — قوانين الفيزياء — بوجه عام وبوضوح بالاستعانة بالقليل من علم الرياضيات. أما الأمور التي تتطلب درجة كبيرة من الكفاءة في علم الرياضيات، فهي اكتشاف وتوسيع نطاق وتطبيق هذه القوانين.

وفي بعض الأحيان يمكن تجنب استخدام الكثير من الرياضيات، وذلك بتقديم العلاقات الكمية باستخدام الرسوم البيانية. فالرسم البياني المختار بعناية، تمامًا كالصورة، يساوي آلاف الكلمات (وكذلك المعادلة الرياضية المختارة بعناية تساوي آلاف الأشكال). ومع ذلك، هناك عدد قليل من الحالات التي يكون فيها استخدام المعادلات أمرًا ضروريًّا، لكن هذا الكتاب لا يحتوي على استنتاجات — مختصرة أو مفصلة — للمعادلات.

تعد أساليب التشبيه مفيدة كذلك في تقديم العلاقات الرياضية. فأثناء مناقشتنا لمفهوم الطاقة، شبهنا الطاقة بالنقود. وهناك مثال آخر أشرنا إليه بالفعل وهو التشابه بين بنية الذرة وبنية المجموعة الشمسية، على اعتبار أن الإلكترونات الذرية تلعب دور الكواكب. فاستخدام التشبيهات يسهل عملية استرجاع المعرفة العامة عند مناقشة المفاهيم الصعبة، وفي الحقيقة، لعبت التشبيهات والنماذج دورًا هامًّا في تطور الفيزياء.

وبالعودة إلى التشبيه السيمفوني سالف الذكر، ثمة اتفاق عام على أن الشخص المثقف لديه بعض التقدير للموسيقى. ولا يحتاج مثل هذا الشخص أن يكون موسيقيًّا أو حتى دارسًا للموسيقى، لكن لا بد أن يكون معتادًا على موضوعات وإيقاعات وأصوات الموسيقى، وأن يكون مقدرًا لها. ويمكن اكتساب الاعتياد والتقدير دون لمس أية آلة موسيقية. بالمثل لا بد أن يتمتع الشخص المثقف حقًّا بقدر من الاعتياد والتقدير لموضوعات وإيقاعات وحقائق العلم. ولا يتعين على هذا الشخص إجراء العمليات الحسابية، سواء أكانت سهلة أم صعبة. وبالطبع سيزداد تقدير النقاط الدقيقة وتعظيم العلم كثيرًا إذا كان الإنسان ملمًّا ببعض المعرفة حول كيفية إجراء العمليات الحسابية، وسوف يصل هذا الشعور إلى أوجه إذا كان الشخص عالمًا، وكذلك الحال بالنسبة لتقدير الشخص للموسيقى إذا كان موسيقيًّا. ومع ذلك، فالموسيقى ليست ولا يجب أن تكون وقفًا على من يجيدون استخدام الآلات الموسيقية، كما أن العلم ليس ولا يجب أن يكون وقفًا على أولئك الذين يتمتعون بقدرات رياضية.

ومن الممكن، ولو أنه أمر صعب، لشخص موهوب يتمتع بقدرات رياضية محدودة أن يصبح عالم فيزياء متميزًا. وقد كان مايكل فاراداي، العالم البريطاني الشهير من القرن التاسع عشر، مثالًا لهذا الشخص. أسهم فاراداي اليتيم الذي تعلم ذاتيًّا بالكثير في كل من الكيمياء والفيزياء. كما أنه قرأ الكثير من الكتب، وباستخدام قدراته المحدودة في الرياضيات، اكتشف أن أساليب التشبيه مفيدة جدًّا. ابتكر فاراداي مفهوم خطوط القوى ليعبر عن المجالين الكهربي والمغناطيسي، مستخدمًا التشبيه بشرائط المطاط. ويرجع إليه الفضل في استخدام هذا التشبيه لتطوير فكرة أن الضوء ظاهرة للموجات الكهرومغناطيسية. وقد اعترف جيمس كلارك ماكسويل الذي طور بعد ذلك النظرية الرياضية الرسمية للطبيعة الكهرومغناطيسية للضوء، أنه بدون الحدس الفيزيائي لفاراداي، ما أمكن له أن يطور نظريته الأكثر دقة.

إن هذا الكتاب مكرس لفكرة أن الأذكياء من العامة يمكنهم استيعاب وتقدير مدلول المفاهيم الفيزيائية الكبرى دون الوقوع في شرك الرياضيات. يتركز الاعتماد هنا على قدرات القراءة وليس القدرات الرياضية، وعلى استعداد القارئ لفهم بعض الأمور عن اقتناع دون الحاجة إلى تبريرها. فغاية الكتاب ليست تقديم البراهين والإثباتات، وإنما توضيح الأمور.

العلم ومحاولات بشرية أخرى؛ أوجه الاختلاف والتشابه

سيكون من المفيد إنهاء هذا الفصل بعقد مقارنة بين العلم وبعض الأنشطة الأخرى، وبمناقشة مختصرة للمنهج العلمي. وهناك عدد من المفاهيم الخاطئة لا بد من التغلب عليها، من أجل فهم أفضل لما يدور حوله العلم.

من المثير للدهشة أن هناك بعض التشابه بين العلم والسحر. وبصرف النظر عن طبيعة السحر التي تقوم على التحايل، عادةً ما ينظر إلى العلم والسحر على أنهما متضادين، وتحديدًا لأن معرفة السحر مقصورة بالضرورة على عدد قليل من الممارسين المبتدئين، كما أنها غير منطقية على الأقل إلى حد ما. على العكس، فإن معرفة وممارسة العلم متاحتان لكل من لديه قدرًا كافيًا من الملكة العقلية للبشر. ومع ذلك، فإن كلًّا من العلم التطبيقي والسحر تحركه الدوافع نفسها، بما في ذلك الرغبة في فهم الطبيعة وفرض السيطرة عليها وإخضاعها للإرادة البشرية. ودائمًا ما تكون هناك رغبة في تفسير الظواهر السحرية أو الخارقة باستخدام المبادئ العلمية. وقد اشتقت بعض فروع العلم على الأقل جزئيًّا من السحر — فالكيمياء مثلًا مشتقة من السيمياء* (Alchemy). بل إن هناك قوانين ومبادئ معينة في السحر تتشابه مع قوانين ومبادئ أخرى في العلم.

فممارسة الودونية (Voodoo) — ديانة قديمة تقوم على السحر والشعوذة — مثلًا تستخدم قانون. ففيها يقوم أحد الأطباء السحرة بعمل دمية تمثل شخصًا ما، ثم يغرس فيها إبرًا أو يلطخها بالأوساخ ليتسبب ذلك في الألم أو المرض للشخص الذي تمثله الدمية. وفي العلم أو التكنولوجيا، يتم تصميم النماذج الرياضية أو العقلية لتمثل الشيء الذي يكون موضوع الدراسة، وتجرى التجارب على النموذج للتعرف

*السيمياء: كيمياء السحر التي تهتم بالحصول على أكسير الحياة الخالدة وتحويل الفلزات الخبيثة إلى ذهب. (المترجمان)

على ما قد يحدث لهذا الشيء أو تلك الظاهرة تحت ظروف معينة. ومفهوم طبعًا أن النموذج ليس هو الشيء الحقيقي، لكن استخدامه يؤدي إلى الحصول على معلومات قيمة.

ويعتبر كثير من الناس أن كلًّا من العلم والدين طريق إلى الحقيقة. وفي أوربا في العصور الوسطى، على الأقل، اعتبر العلم وصيفًا لعلم اللاهوت، وما زال الكثير من الناس يصارعون مشكلة الدمج بين معتقداتهم العلمية والدينية. وغالبًا ما تقابل الاكتشافات أو التقدمات العلمية الجديدة والكبرى على أنها إما تؤيد أو تدحض وجهة نظر لاهوتية معينة. وفي هذا الصدد، من المهم أن نضع نصب أعيننا بعض السمات الضرورية المميزة للعلم. فالعلم والاستنتاجات العلمية أمور تجريبية دائمًا ما تخضع لعمليات التنقيح عند اكتشاف دليل جديد. لذلك، فإن إسناد المعتقدات الدينية إلى الأسس العلمية يوفر تأييدًا للدين لا يمكن وصفه سوى بأنه غير جدير بالثقة.

يهدف العلم إلى تفسير الظواهر باستخدام المصطلحات التي يمكن أن يفهمها الناس دون طلب وحي أو تدخل إلهي. ولا بد للمعرفة العلمية أن تكون قابلة للتحقق أو الاختبار، ويفضل أن يتم ذلك باستخدام مصطلحات كمية. أما المعجزة، من جهة أخرى، فلا يمكن تفسيرها علميًّا، وإلا لما اعتبرت معجزة من الأساس. وعمومًا، فالمعجزات غير قابلة للتكرار، بينما الظواهر العلمية يمكن أن تتكرر. ويرجع السبب وراء نجاح العلم في مساعيه على هذا النحو إلى حقيقة أنه قد قيد نفسه بالظواهر أو المفاهيم التي يمكن اختبارها مرارًا وتكرارًا، عند الرغبة في ذلك. إلا أن قبول مثل هذه القيود يعني أن العلم لا يستطيع أن يكون أداة لتوجيه سلوك أو الأخلاق أو إرادة البشر، فضلاً عن تحديد أي الأفعال الحسية ممكن من الناحية المنطقية. وبالإضافة لذلك، لا يمكن للعلم من الناحية المنطقية أن يبحث في التساؤل الخاص بالسبب الأساسي وراء وجود الكون على الإطلاق، على الرغم من أنه من المثير للدهشة إدراك أن هذا الكم الهائل من تاريخ وتطور الكون إنما استُنبط من خلال العلم.

كان العلم عمومًا، والفيزياء بالتحديد، يعتبر فيما مضى فرعًا من فروع الفلسفة المعروفة باسم الفلسفة الطبيعية. أما الميتافيزيقيا، فهي فرع الفلسفة الذي يتناول طبيعة الواقع، وتحديدًا باستخدام المفهوم الدنيوي وليس اللاهوتي. ومن الأسئلة التي تتعلق بمجال الميتافيزيقيا: هل هناك مبادئ موحدة في الطبيعة، وهل الواقع مادي أم خيالي أم يعتمد فقط على إدراكنا الحسي. بل ويصل الأمر إلى أن بعض

المفاهيم مثل المكان والزمان — اللذين يلعبان دورًا مهمًا في صياغة الفيزياء — تقع في مجال الميتافيزيقيا. ووفقًا لهذا المفهوم، فإن الفلسفة ترتبط كثيرًا بالفيزياء (على الرغم من أن الفلاسفة لم يسهموا بمعرفتهم الفلسفية كثيرًا في الفيزياء). كذلك، فإن النتائج التجريبية للفيزياء ترتبط بدورها بالميتافيزيقيا ارتباطًا كبيرًا.

وقد كان لنتائج الفيزياء أيضًا بعض التأثير (أحيانًا بالاستناد إلى التفسيرات الخاطئة) على الأخلاق، من خلال تأثيرها على الميتافزيقيا في المقام الأول. فمثلًا، اقتبس مؤيدو فكرة النسبية الأخلاقية وجهات نظرهم من النظرية النسبية، وهو ما لم يرض عنه ألبرت أينشتاين.

ومن المهم التمييز بين العلم والتكنولوجيا. يعرف القاموس التكنولوجيا على أنها: «مجموع الوسائل المستخدمة لتوفير الأشياء الضرورية لدعم البشر ورفاهيتهم.» ويقع العلم التطبيقي ضمن هذه الوسائل. أما العلم على الجانب الآخر، فيعد كيانًا منظمًا من المعرفة التي يمكن استنباط تفاصيلها من عدد صغير نسبيًّا من القوانين العامة باستخدام التفكير العقلاني. وقد يفكر المرء في معجون الأسنان، والتليفزيون، والدوائر المتكاملة، وأجهزة الكمبيوتر، والأدوية، والسيارات، والطائرات، والأسلحة، والملابس، وغيرها، وفي الوسائل والتقنيات الخاصة بإنتاجها على أنها نواتج أو مكونات للتكنولوجيا. أما «نواتج» أو مكونات العلم، على الجانب الآخر، فتتمثل في قوانين نيوتن للحركة، والتأثيرات الكهروضوئية، وثبات سرعة الضوء في الفراغ، وفيزياء أشباه الموصلات، وغيرها، والتقنيات الخاصة بدراستها.

إن أوجه الاختلاف بين العلم والتكنولوجيا ليست محددة أو واضحة دائمًا. فيمكن اعتبار أن أشعة الليزر — على سبيل المثال — تنتمي إلى نطاق العلم أو التكنولوجيا. وعلى الرغم من أن التركيز في العلم ينصب على الفهم، بينما ينصب على التطبيق في التكنولوجيا، فإن كلاً من الفهم والتطبيق يعزز وييسر من الآخر بوضوح. ولهذا السبب، فإن المجتمعات ذات التوجهات الواقعية مستعدة لإنفاق مبالغ كبيرة من المال على المساعي العلمية، مع أن فضول العقل البشري الذي لا يكون مرتبطًا تقريبًا بموضوع البحث هو ما يميز العلم.

إن أي كتاب يتناول شرح العلوم الفيزيائية أو الطبيعية أو الاجتماعية يتضمن وصفًا «للمنهج العلمي»، الذي من المفترض أن يكون أسلوبًا فعالًا في اكتشاف أو التحقق من المعلومات أو النظريات العلمية، وفي حل جميع أنواع المشكلات العلمية والبشرية. ويمكن إيجاز خطوات المنهج العلمي كالآتي: (١) جمع الحقائق أو

البيانات. (٢) تحليل الحقائق والبيانات في ضوء المبادئ المعروفة والمطبقة. (٣) صياغة الفرضيات التي ستفسر الحقائق؛ لا بد أن تكون تلك الفرضيات متسقة مع المبادئ القائمة قدر الإمكان. (٤) استخدام الفرضيات للتنبؤ بحقائق أو نتائج أخرى يمكن أن تستخدم لاختبار صحة الفرضيات إلى حد أبعد من خلال زيادة مخزون الحقائق في الخطوة (١). ويتم تكرار هذه السلسلة من الخطوات بترتيب منظم كلما كان ذلك ضروريًّا لإرساء إحدى الفرضيات التي تم التأكد من صحتها. ويتسم المنهج العلمي بقابلية التعديل والتصحيح الذاتي، بمعنى أن الفرضيات معرضة للتعديل دائمًا في ضوء الحقائق المكتشفة مؤخرًا. فإذا كانت الفرضيات صحيحة في كل تفاصيلها، فلا داعي إذن للتعديل.

مع أن الخطوات السابقة تمثل الأسلوب النموذجي للبحث العلمي، فإن ممارسي «فن» البحث العلمي قد لا يتبعون هذا الأسلوب في الواقع، حتى في الفيزياء. وغالبًا ما يلعب الحس الباطني أو الحدس دورًا مميزًا. ومن المهم جدًّا أن يكون الإنسان قادرًا على طرح الأسئلة الصحيحة والمهمة في الوقت المناسب، وإيجاد الإجابات الخاصة بهذه الأسئلة. وأحيانًا يكون من الضروري إهمال الحقائق المزعومة، إما لأنها ليست حقائق فعلًا، أو أنها غير مناسبة أو غير متسقة (أحيانًا مع مفهوم سابق)، أو تحجب حقائق أخرى أكثر أهمية، أو تزيد الموقف تعقيدًا. فمثلًا، يقال إن أينشتاين سئل ذات مرة عما كان سيفعل لو أن تجربة مايكلسون ومورلي الشهيرة (الفصل السادس) لم تؤكد ثبات سرعة الضوء، كما تتطلب نظرية النسبية. جاءت إجابة أينشتاين بأنه كان سيهمل مثل هذه النتيجة التجريبية، لأنه كان قد استنتج بالفعل أن سرعة الضوء لا بد وأن تكون ثابتة.

وغالبًا ما يلعب حظ الصدفة — الذي يدعى أحيانًا السرنديبية* Serendipity — دورًا إما في الكشف عن قدر هام من المعلومات أو في الكشف عن حل بسيط. هكذا كان الحال في اكتشاف فيلهيلم رونتجن Wilhelm Roentgen لأشعة إكس. (من المثير للغاية أنه اتبع المنهج العلمي النموذجي بدقة باللغة في استكمال دراسته لطبيعة أشعة إكس، حيث كشف النقاب عن العديد من السمات المميزة، لكنه في النهاية توصل إلى استنتاج خاطئ.)

*اكتشاف الأشياء النفيسة والثمينة بالصدفة. (المترجمان)

وختامًا، وعلى الرغم من الغموض والتناقض اللذين يحيطان بالعلماء عند تطبيق كل منهم لطريقته، فإنه لا بد من الوفاء بمتطلبات المنهج العلمي المذكورة آنفًا. أما النظرية العلمية التي لا تتفق مع التجربة، فلا بد من تعديلها في النهاية على نحو مرضٍ أو استبعادها. بالمثل، فإن كل نظرية، مهما كان واضعها متميزًا، لا بد لها أن تفي بالمتطلبات المذكورة للمنهج العلمي. لا بد من تكرار التجارب في ظل ظروف مختلفة وعلى أيدي أشخاص مختلفين. ولا بد أيضًا أن تكون النتائج متسقة مع بعضها ومع النتائج الأخرى. ولا بد للفرضيات أن تكون مدعومة بالبراهين. أما القيام بما هو أقل من ذلك، فسيؤدي في النهاية إلى علم زائف وخداع.

إن الدراسة المتعمقة للعلم تحقق القوة، بالمفهوم الواسع والمفهوم العملي والواقعي والمفصل على حدٍ سواء. وتتسم القوة الناتجة بأنها هائلة إلى حد يثير الاهتمام بعدم استخدامها في تدمير الذات بدلًا من الاستفادة منها في تحقيق منافع للبشر. يقدم العلم كذلك نظرة وفهمًا متعمقًا لأعمال الطبيعة. فهناك قدر من التطابق والمنطقية في العالم المادي يبعث على الشعور بالدهشة. ولن تكشف المادة التي ستقدم في الفصول التالية من هذا الكتاب عن الكثير من قوة الفيزياء، فبدلًا من ذلك، نأمل أن يكوِّن القارئ فكرة عن جمال وبساطة وتناغم وعظمة بعض القوانين الأساسية التي تحكم العالم. كما نأمل أن يأسر الكتاب ويشبع مخيلة القارئ. وباستخدام مصطلحات التشبيه السيمفوني مرة أخرى، حان الوقت لإنهاء مقطوعة الاستهلال من أجل الاستمتاع بالحركة الأولى في السيمفونية العلمية.

الفصل الثاني

علم الفلك الكوبرنيكي

الأرض ليست مركز العالم



نيكولاوس كوبرنيكوس
(الصورة مهداة من مرصد بيركس، جامعة شيكاغو).

ثمة اعتقاد عام بأن الأرض كوكب يدور حول الشمس في مسار دائري تقريبًا، وأن القمر يدور حول الأرض بالطريقة نفسها. وفي الحقيقة، فإننا — في «عصر الفضاء» الحالي — ننظر إلى القمر كتابع طبيعي للأرض لا يختلف في حركته عن

العدد الهائل من الأقمار الصناعية التي أطلقت من الأرض منذ عام ١٩٥٨. وتعد الرحلات التي تتم إلى القمر حقيقة مؤكدة، كما أن رحلات الفضاء من وإلى الكواكب البعيدة — بل وحتى المجرات — صارت أمرًا مألوفًا في خيال العامة وفي أفلام السينما وعلى شاشات التليفزيون. ومع ذلك، فمنذ أربعة أو خمسة قرون، كان أي شخص يجرؤ على الحديث عن مثل هذه الأفكار يعتبر مختلًّا إن لم يكن مهرطقًا. وفي الحقيقة، فإن إدراكنا للأمور يجعلنا نعتقد بأن الأرض لا تتحرك، وأن الشمس وكل الأجرام السماوية هي التي تتحرك في مسارات دائرية حول الأرض الثابتة.

مع مرور كل أربع وعشرين ساعة، يسطع كل من الشمس والقمر والكواكب والنجوم من جهة الشرق لتجتاز السماء وتدلُك في الغرب، حيث تتوارى عن الأنظار عددًا من الساعات قبل أن تظهر ثانية. ومنذ بضعة قرون فقط، كانت المعرفة المتاحة بأكملها للحضارة الغربية تشير إلى أن الأرض ثابتة ومتمركزة في مركز العالم. وسنعرض في هذا الفصل تطور نموذج مركزية الأرض بالنسبة للكون، ثم الإطاحة به واستبداله بالمفاهيم الحديثة، وهو ما يكشف الكثير حول تطور وطبيعة التفكير العلمي.

الأنشطة العلمية المبكرة في منطقة البحر المتوسط

من الصعب تتبع الأصول الخاصة بعلوم الغرب. ولتحقيق أهدافنا، يكفي أن نشير إلى بعض المصادر والدوافع المعترف بها عمومًا. وربما يأتي في المقام الأول ذلك الميل الإغريقي للتجريد والتعميم. وبالطبع تأثر الإغريق كثيرًا من احتكاكهم التجاري والحربي مع حضارات ما بين النهرين والحضارة المصرية. وقد تمكنت هذه الثقافات من تجميع كم هائل من البيانات الفلكية بالغة الدقة، كما طورت بعض الأساليب الرياضية لاستخدام هذه البيانات في التجارة ومسح الأراضي والهندسة المدنية والملاحة، وتحديد التقويمات المدنية والدينية. وبمعلومية التقويم، يكون من الممكن تحديد وقت زراعة المحاصيل، والفصول المناسبة للتجارة أو لخوض غمار الحرب، وكذلك أوقات إقامة المهرجانات والطقوس. ولكن التقويم نفسه يتحدد وفقًا لأوضاع الأجرام السماوية. (فمثلًا، في نصف الكرة الشمالي، تكون الشمس مرتفعة وناحية الشمال في الصيف، بينما تكون منخفضة وناحية الجنوب في الشتاء.) وقد اكتشفت الثقافات القديمة — وبعض الثقافات الأكثر حداثة — دلائل مهمة على المستقبل في صورة «إشارات» أو بشائر ترى في السماء. (وعلى مستوى أكثر واقعية، عندما يكون

البحارة بعيدين عن الأرض، فإنهم يستطيعون الإبحار عن طريق قياس موضع الأجرام السماوية المعروفة المختلفة.)

وعمومًا، لم تكن الحضارات القديمة تميز بوضوح بين الأمور الدنيوية والدينية الشائعة في المجتمع الغربي الحديث، لذا فقد وجدوا بالطبع أن هناك روابط بين جميع جوانب المساعي والمعرفة البشرية؛ علم الأساطير والدين؛ علم الفلك وعلم التنجيم وعلم الكون. وبالنسبة للحضارة الغربية، ربما يكون تطور علم التوحيد الأخلاقي على يد الإسرائيليين القدماء، إضافةً إلى بحث الإغريق عن أساس عقلاني يفسر السلوك البشري، قد ساعد في حث الفلاسفة على محاولة توحيد كل فروع المعرفة.

وقد أكد الفلاسفة الإغريق سقراط وأفلاطون وأرسطو على ضرورة ممارسة السيطرة على الحضارات والأمم بحكمة وتبعًا لأسمى المبادئ الأخلاقية. وقد تطلب ذلك فهمًا ومعرفة بالفضائل. وكان المتطلب الرئيسي لفهم الفضائل هو فهم العلم — الحساب والهندسة والفلك والهندسة الفراغية. ولم يكن كافيًا الحصول على الخبرة في هذه الموضوعات، بل كان من الضروري كذلك فهم طبيعتها الأساسية وعلاقتها بالفضائل. ولم يمكن تحقيق هذا الفهم ممكنًا إلا بعد دراسة شاقة وطويلة. فكان أفلاطون، مثلًا، يشعر أن المرء لا يمكن أن يدرك الطبيعة الأساسية لمثل هذه الموضوعات دون أن يجيد تفاصيلها واستخداماتها إجادة شاملة.

ووفقًا للتقاليد، فقد تحقق الاعتراف بالرياضيات كموضوع يستحق الدراسة في حد ذاته، دون النظر إلى استخدامها في الأمور العملية، منذ ألفين وستمائة عام على يد الفيلسوف طاليس Thales الذي عاش على الساحل الآسيوي لبحر إيجه. وبعد مضي بعض الوقت أعلن أتباع فيثاغورس (الذين عاشوا في إحدى المستعمرات الإغريقية في إيطاليا) أن العالم كله محكوم بالأرقام. وكانت الأرقام التي أشاروا إليها أعدادًا صحيحة أو نسبًا لأعداد صحيحة. وكانوا يعتبرون أن جميع الأشياء تتكون من وحدات بناء منفردة، أطلقوا عليها ذرات. ولأن الذرات وحدات متمايزة، فإنه يمكن عدها — مما يعني في رأي الفيثاغورسيين أنه يمكن اعتبار الهندسة فرعًا من الحساب.

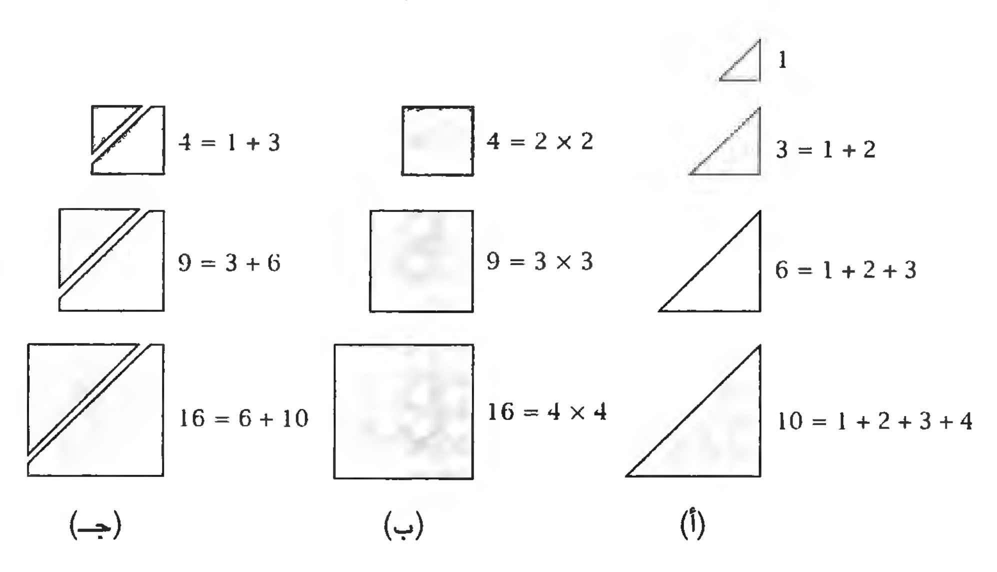
ومع ذلك، سرعان ما اتضح أن هناك أعدادًا، مثل π (ط أو النسبة التقريبية) و$\sqrt{٢}$ لا يمكن التعبير عنها كنسب لأعداد صحيحة. ولذلك، سميت هذه الأعداد «أعدادًا صماء» Irrational Numbers، إلا أن ذلك قد تسبب في مشكلة، لأنه يعني أن عددًا كبيرًا من المثلثات لا يمكن بناؤها من الذرات، فالمثلث متساوي الساقين، مثلًا، يمكن

أن يضم عددًا صحيحًا من الذرات على طول كل ضلع من أضلاعه. ويكون للوتر $\sqrt{٢}$ من الذرات، لكن ذلك مستحيل لأن $\sqrt{٢}$ من الأعداد الصماء، وكل عدد صحيح يضرب في $\sqrt{٢}$ سيصبح من الأعداد الصماء كذلك، وعليه، فهو لا يمكن أن يمثل عددًا صحيحًا من الذرات. ويذكر أن الفيثاغورسيين اكتشفوا أن وجود الأعداد الصماء يسبب لهم إزعاجًا، فحاولوا إبقاءها طي الكتمان.*

وعلى الرغم من ذلك، كان من الممكن تكوين روابط بين الحساب والهندسة من خلال المعادلات، مثل نظرية فيثاغورس التي تربط الأضلاع الثلاثة في المثلث قائم الزاوية ($A^2 + B^2 = C^2$)، أو بين المحيط ونصف قطر الدائرة ($C = 2\pi r$)، أو بين مساحة الدائرة ونصف قطرها ($A = \pi r^2$)، وهكذا. وكان من الممكن ترتيب بعض الأعداد في صورة أنساق هندسية، واكتشاف العلاقات بين هذه الأنساق. وقد بينا هذا الأمر في الشكل ٢-١، الذي استخدمت فيه الدوائر لتمثيل الأعداد. ويبين شكل ٢-١(أ) الأعداد «المثلثية» مثل: ١، ٣، ٦، ١٠. بينما يبين شكل ٢-١(ب) الأعداد «التربيعية» ٤، ٩، ١٦. واتحاد عددين متتاليين من الأعداد المثلثية يعطي عددًا تربيعيًّا، كما هو مبين في الشكل ٢-١(جـ). ويقال إن الفيثاغورسيين كانوا يعتقدون بشدة في أهمية الرياضيات لدرجة أنهم أسسوا عبادة دينية قائمة على الأعداد.

لم يكن تخصيص أهمية للأعداد قاصرًا على الإغريق. فتبعًا لمذهب الكابالا اليهودي، يمكن اكتشاف المعنى الأعمق لبعض الكلمات وذلك بجمع الأعداد المرتبطة بالحروف المكونة لها، وسيكون المجموع الناتج معبرًا عن دلالة معينة وغير واضحة للكلمة. وفي هذه الأيام، هناك أرقام «حظ» وأرقام «شؤم» مثل العددين ٧ و١٣. وتقوم ألعاب الورق والمراهنات على الأعداد. وبعض المباني ليس بها الطابق الثالث عشر، حتى لو كان بها الطابقين الثاني عشر والرابع عشر. وفي الفيزياء النووية، يشار إلى الأعداد السحرية، بمعنى أن الأنوية التي تحتوي على أعداد معينة من البروتونات أو النيوترونات تكون مستقرة بشكل واضح وتعتبر أعدادها «سحرية».

*لو أن $\sqrt{٢}$ يساوي بالضبط ١٫٤، لكان سيساوي النسبة بين عددين صحيحين هما: ١٤ و١٠، أي ١٤ / ١٠. وإذا كان الأمر كذلك، فإن المثلث قائم الزاوية متساوي الساقين الذي يحتوي على عشر ذرات على ضلعيه، لا بد وأن يكون له أربع عشرة ذرة على الوتر. ولكن $\sqrt{٢}$ أكبر قليلًا من ١٤ / ١٠، وبذا لا بد أن يكون للمثلث أكثر من أربع عشرة ذرة (وأقل من خمس عشرة ذرة) على الوتر. ومن المستحيل إيجاد عددين صحيحين نسبتهما تساوي $\sqrt{٢}$ تمامًا، وطبعًا ستختفي هذه المشكلة إذا استبعدنا الفرض القائل بأن الذرات تمثل أساس الهندسة. وقد يكون ذلك أحد الأسباب وراء عدم تطوير الإغريق مفهوم الذرات بصورة جدية. وقد ظل هذا المفهوم ثابتًا لا يتطور لمدة حوالي ألفي عام.

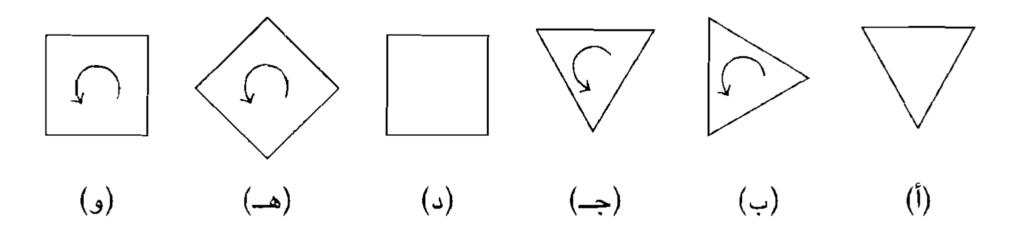


شكل ٢-١: الأعداد المثلثية والتربيعية. (أ) الأعداد المثلثية كترتيبات لعناصر منفردة. (ب) الأعداد التربيعية كترتيبات لعناصر منفردة. (جـ) الأعداد التربيعية الناتجة عن اتحاد عددين مثلثيين متتاليين، حيث يقلب المثلث الأول لينطبق على المثلث الثاني.

وفي الفيزياء الذرية، بذلت الجهود خلال فترة ما لإيجاد المغزى وراء أن قيمة ما يسمى ثابت البنية الدقيقة تساوي بالضبط ١/١٣٧.

كان الإغريق القدماء كذلك مفتونين بالأشكال الهندسية المنتظمة والمتعددة، حيث طوروا تسلسلًا هرميًّا لترتيب هذه الأشكال. فمثلًا، يمكن اعتبار أن المربع يمثل درجة أعلى في الكمال عن المثلث متساوي الأضلاع. فإذا أدرنا مربعًا حول مركزه بمقدار ٩٠ درجة، فإن شكله لن يتغير (راجع الشكل ٢-٢). أما المثلث المتساوي الأضلاع، فلا بد من إدارته ١٢٠ درجة ليستعيد شكله السابق. ويحتاج الشكل السداسي إلى الدوران ٦٠ درجة فقط ليحتفظ بشكله. أما الشكل الثماني، فيحتاج إلى الدوران ٤٥ درجة فقط، والشكل ذو الاثني عشر ضلعًا يحتاج إلى الدوران ٣٠ درجة فقط.

وكلما زاد عدد أضلاع الشكل المنتظم، قلت الزاوية التي يحتاجها للدوران حتى يستعيد شكله الأصلي. وفي ضوء هذا المفهوم، يزداد كمال الشكل كلما ازداد عدد أضلاعه. وكلما زاد عدد الأضلاع اقترب الشكل أكثر فأكثر من مظهر الدائرة، ولذا من الطبيعي أن ينظر إلى الدائرة على أنها أكثر الأشكال المستوية (أو ثنائية البعد) التي يمكن رسمها كمالًا. فمهما أدرنا الدائرة قليلًا أو كثيرًا حول مركزها، فسيظل شكلها الأصلي ثابتًا. ومن المهم ملاحظة أن الكمال يتحدد بالثبات — فالشيء الكامل



شكل ٢-٢: الأعداد الهندسية والتماثل. (أ) مثلث متساوي الأضلاع. (ب) دوران المثلث ٩٠°. (جـ) دوران المثلث ١٢٠° من وضعه الأصلي إلى وضع جديد لا يمكن تمييزه عن الوضع الأصلي. (د) مربع. (هـ) دوران المربع ٤٥°. (و) دوران المربع ٩٠° من وضعه الأصلي إلى وضع جديد لا يمكن تمييزه عن الوضع الأصلي.

لا يمكن تحسينه، ولذا لا بد أن يظل ثابتًا. ويصف الكتاب الرائع «الأرض المسطحة» Flatland الذي كتبه إدوين أبوت عالمًا خياليًّا ذا بعدين تسكنه أشكال ثنائية البعد تتحدد هويتها من خلال أشكالها. فالنساء مثلًا، أكثر الكائنات قدرة على إحداث الدمار، يعبر عنها باستخدام خطوط مستقيمة، وبالتالي، فهي قادرة على الإصابة بجروح قاتلة، تمامًا كالسيف مستدق الرأس ذي الحدين. وتبعًا لنموذج الكمال الإغريقي، تعبر الدائرة الكاملة عن أكثر الرجال حكمة.

ساعد اهتمام الإغريق بالكمال والهندسة في التمهيد لطريقة تناولهم للعلوم. ويتضح هذا الأمر بالتحديد في رواية أفلاطون الشهيرة «الكهف». ففي هذه الرواية، تخيل أفلاطون (٣٤٧–٤٢٧ق.م) البشر على شكل عبيد مسلسلين معًا في كهف عميق مظلم به يصله ضوء خافت من نار بعيدة مشتعلة خلفهم وفوقهم. وهناك حائط وراءهم وحائط من أمامهم. وكانت أغلالهم وأصفادهم تمنعهم من الالتفات لرؤية ما يحدث خلفهم. وكان بعض الناس يتحركون جيئة وذهابًا على الجانب الآخر من الحائط الذي يقع خلفهم وهم يحملون أشياء مختلفة فوق رءوسهم ويصدرون أصواتًا وضجيجًا مبهمًا غير مفهوم للعبيد. ولا يستطيع العبيد رؤية أي شيء إلا ظلالًا لهذه الأشياء التي يلقي بها ضوء النار على الحائط أمامهم، أو سماع أي شيء سوى الأصوات الخافتة التي تنعكس على الحائط من أمامهم. لم يشاهد العبيد سوى هذه الظلال طوال حياتهم، وبالتالي، فهم لا يعرفون أي شيء آخر.

في أحد الأيام، تحرر أحد العبيد (الذي سيصبح فيما بعد فيلسوفًا) من أغلاله، وانطلق خارجًا من الكهف إلى العالم الواقعي المضيء والجميل، بعشبه وأشجاره الخضراء وسمائه الزرقاء، وغير ذلك من الأشياء الأخرى. لم يكن هذا العبد قادرًا في

البداية على استيعاب ما يراه لأن عينيه لم تعتادا على الضوء الساطع. وفي الواقع، كان تأمل العالم الواقعي في البداية أمرًا شاقًا، إلا أن العبد السابق اعتاد في النهاية على هذه الحرية الجديدة. وعلى الرغم من أنه لم تكن لديه رغبة في العودة إلى الحالة البائسة التي كان يعيشها من قبل، فإن الواجب يحتم عليه العودة إلى الكهف ليحاول تنوير رفاقه. وليست هذه بالمهمة السهلة، لأن عليه أن يعتاد ثانية على الظلام، وأن يفسر الظلال باستخدام أشياء لم يرها العبيد الآخرون أبدًا. ولكن العبيد يرفضون جهوده، وجهود كل من على شاكلته من الآخرين، مهددين إياهم بالموت إذا هم أصروا على ذلك (كما حُكم بالفعل على سقراط معلم أفلاطون). وعلى الرغم من ذلك، أصر أفلاطون على أن الواجب يستلزم المثابرة من جانب على الرغم من أي تهديدات أو عواقب.

تتمثل أولى المهام المفروضة على الفيلسوف في تحديد الواقع، أو الحقيقة، وراء الطريقة التي تظهر بها الأشياء. وقد أشار أفلاطون كمثال على ذلك إلى المظهر الخارجي للسماوات التي هي موضوع علم الفلك. فالشمس تشرق وتغرب يوميًّا، كما هو الحال بالنسبة للقمر؛ ويمر القمر بأطوار كل شهر تقريبًا. كذلك، تكون الشمس أعلى في الصيف منها في الشتاء، بينما تظهر نجوم الصباح المساء وتختفي. تلك هي «المظاهر الخارجية» للسماوات، لكن الفيلسوف (العالم في العصر الحالي) لا بد أن يكتشف الواقع الحقيقي وراء هذه المظاهر: ما الذي يتسبب في مسارات النجوم في السماء؟ ووفقًا لأفلاطون، فإن الواقع الحقيقي لا بد أن يكون كاملًا أو مثاليًا، ولا بد للفيلسوف أن يضع الرياضيات، وبالتحديد الهندسة، نصب عينيه ليكتشف الواقع الحقيقي لعلم الفلك.

تبدو معظم الأجرام في السماء، مثل النجوم، كأنها تتحرك في مسارات دائرية حول الأرض كمركز لها، ومن المثير أن نستنتج أن طبيعة الحركة الحقيقية للأجرام السماوية لا بد أن تكون دائرية، لأن الدائرة تمثل أكثر الأشكال الهندسية كمالًا. ولا يهم إذا كانت جميع الأجرام السماوية تبدو وكأنها تتحرك في مسارات دائرية أم لا، فمع كل هذا، يمكن للبشر تصور ظلال الواقع الحقيقي فحسب. ومهمة الفيلسوف (أو العالِم) أن يبين كيف أن تصورات البشر تشوه طبيعة الحركة الحقيقية التامة للأجرام السماوية. وقد أوضح أفلاطون أن مهمة علم الفلك هي اكتشاف الطريقة التي يمكن بها وصف حركة الأجرام السماوية بمدلول الحركة الدائرية. وقد أطلق على هذه المهمة «إنقاذ المظاهر». أما هدف اكتشاف الواقع الحقيقي، فما زال من الأهداف الرئيسية للعلم، ولو أن تعريف الواقع الحقيقي الآن يختلف إلى حد ما عن تعريف



شكل ٢-٣: تعرض الصورة فترة من الزمن للسماء ليلًا، فريتس جورو، مجلة «لايف» Life Magazine.

أفلاطون. وقد أثر هذا الهدف بشدة في الطريقة التي يتم من خلالها مواجهة المشكلات العلمية. وفي بعض الحالات، أدى ذلك إلى التوصل لآراء ثاقبة، وفي حالات أخرى، عندما بُحث الأمر حرفيًّا أكثر مما ينبغي، شكل ذلك عائقًا كبيرًا أمام تقدم العلم.

نظرية مركزية الأرض في الكون

إذا التقطنا صورة بالتعريض الزمني للسماء ليلًا على مدى فترة تصل إلى بضع ساعات، فإن النتيجة ستكون كما في الشكل ٢-٣. وأثناء هذا الوقت كان غالق الكاميرا مفتوحًا، وكانت مواقع النجوم المختلفة في السماء تتغير، وقد تم تتبع مسارات حركاتها الظاهرية بواسطة خطوط على شكل أقواس، تمامًا مثل صور شارع في مدينة ليلًا حيث تظهر خطوط الضوء من المصابيح الأمامية للسيارات المارة. فإذا تركت فتحة العدسة مفتوحة على مدى أربع وعشرين ساعة (وإذا أمكن بشكل ما «إطفاء» الشمس)، فإن الكثير من الخطوط، وبالتحديد بالقرب من النجم القطبي، ستصبح دوائر كاملة. ولأنه لا يمكن إطفاء الشمس، فإن الصورة تلتقط فقط أثناء ساعات الإظلام، وبذلك لا نحصل إلا على جزء فقط من الدوائر الكاملة، مساوٍ للجزء من الساعات الأربع والعشرين الذي كانت الكاميرا مفتوحة أثناءه. وإذا

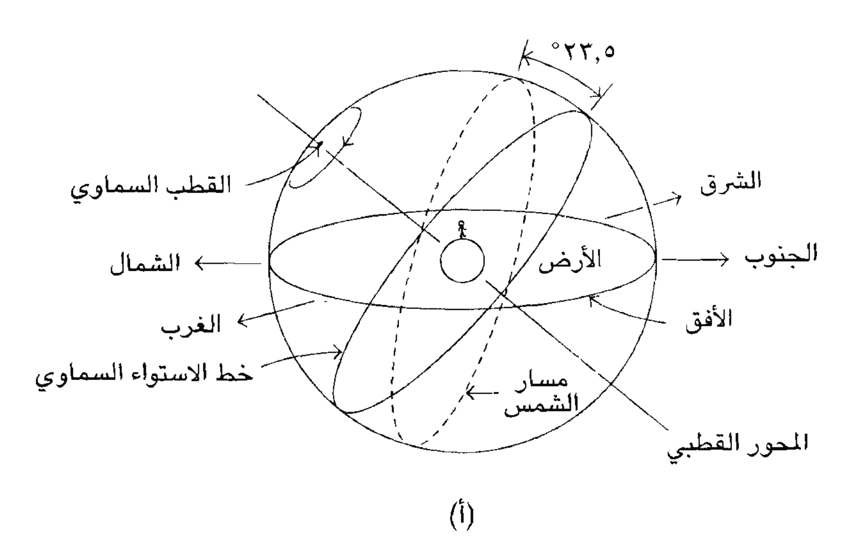
التقطت الصورة ليلة بعد أخرى فستكون الصورة تقريبًا هي نفسها، مع بضعة استثناءات سنناقشها فيما بعد.

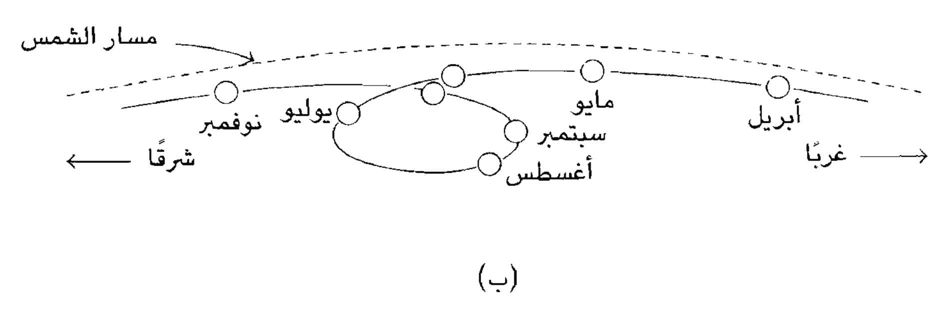
ويبدو أن الأرض محاطة بسقف أو قبة كروية عملاقة، تسمى الكرة النجمية أو الكرة السماوية، وتبدو النجوم كنقاط مضيئة صغيرة مثبتة في تلك القبة (شكل ٢-٤(أ)) وتدور القبة حولنا مرة كل أربع وعشرين ساعة من الشرق إلى الغرب (من الشروق إلى الغروب). كما أن الشمس والقمر والكواكب هي الأخرى مثبتة على هذه الكرة. وطبيعي أنه إذا كانت الشمس مشرقة فإننا لا نستطيع رؤية النجوم لأن ضوء الشمس الساطع، الذي يتشتت بواسطة الغلاف الجوي للأرض، يجعل من المستحيل رؤية ضوء النجوم الواهي. (وأثناء كسوف الشمس، من الممكن رؤية النجوم بشكل جيد).

وبواسطة المراقبة بصبر والقياس، كان قدماء الفلكيين والمنجمين، الذين لم يكن لديهم أجهزة تصوير، قادرين على مشاهدة ورصد مسارات الدوران اليومي الذي يسمى الدوران اليومي Diurnal Rotation أو الحركة اليومية Diurnal Motion للكرة السماوية. وكانوا قادرين على تحديد أن كل الأجرام السماوية، ما عدا استثناءات قليلة، مثبتة في مواقعها على الكرة السماوية الدوارة. وبمرور الوقت تعرفوا على أن الأرض نفسها كروية هي الأخرى، وتظهر بمواقعها في مركز الكرة السماوية. ويعتمد الجزء من الكرة السماوية الذي يمكن رؤيته على نقطة المشاهدة على الأرض. وعند القطب الشمالي للأرض ستكون مراكز الدوائر مباشرة فوق الرءوس. وعند خط عرض ٤٥ درجة، سيكون القطب السماوي (مراكز الدوائر) بزاوية ٤٥ من الأفق الشمالي (في نصف الكرة الشمالي)، بينما على خط الاستواء سيكون القطب السماوي عند الأفق الشمالي.

وفي السابق اعترفوا بأن بضعة أجرام معينة على الكرة السماوية لم تكن مثبتة، بدت هذه الأجرام وكأنها تتحرك بالنسبة إلى خلفية النجوم. وموقع الشمس، مثلًا، على الكرة يتغير على مدار السنة، وهي تتبع مسارًا يسمى بيضاويًّا، كما هو مبين في شكل ٢-٤(أ) على شكل دائرة منقطة تميل بزاوية ٢٣,٥ درجة على خط الاستواء السماوي. واتجاه حركة الشمس من الغرب إلى الشرق (عكس الدوران اليومي.)*

*لا يتعارض ذلك مع الملاحظة العامة الشائعة أن الشمس تنتقل من الشرق إلى الغرب، لكنه يعني ببساطة أن شروق الشمس دائمًا يتأخر قليلًا مقارنة «بشروق النجوم»؛ لأن موقع الشمس على الكرة السماوية قد تغير.





شكل ٢-٤: الكرة السماوية. (أ) رسم تخطيطي للكرة يبين الأرض في المركز والمدار البيضاوي. (ب) منظر مكبر جدًا لجزء من مسار كوكب على طول المدار البيضاوي، يبين الحركة التراجعية.

كذلك يتغير موقع القمر، وهو ينتقل من الغرب إلى الشرق على المدار البيضاوي مرة كل ٢٧,٣٣ يومًا في المتوسط. وبالمثل، تتحرك الكواكب التي ترى بالعين المجردة: عطارد والزهرة والمريخ والمشتري وزحل، فهي تنتقل تقريبًا على مسار بيضاوي، من الغرب إلى الشرق، مستغرقة من تسعين يومًا إلى ثلاثين عامًا لتكمل الدائرة.

وتسمى حركة الشمس بالحركة السنوية، وهي على الأغلب ناعمة ومنتظمة، لكن ليس تمامًا. وحركة القمر إلى حد ما هي الأخرى ناعمة، لكنها أقل نعومة من حركة الشمس. أما حركة الكواكب من جهة أخري، فهي متنوعة في سرعتها، وفي بعض الأحيان في اتجاهها كذلك. وفي الحقيقة، فإن هذا هو مصدر كلمة كوكب Planet، الذي يعني الهائم (أو التائه أو الطواف). وعندما يغير كوكب ما من اتجاه

حركته أحيانًا، فإنه يبدو وكأنه يتحرك من الشرق إلى الغرب بالنسبة للنجوم الثابتة بدلًا من اتباع مساره العام من الغرب إلى الشرق. وتسمى هذه الحركة تراجعية Retrograde، وهي مصورة في شكل ٢-٤(ب)، الذي يبين مسار كوكب لا يغير فقط من اتجاهه ولكنه يهيم قليلًا مبتعدًا عن المدار البيضاوي كذلك. ويرافق الحركة التراجعية تغيرات في درجة سطوع الكوكب.

وفي بعض الأوقات يكون الكوكب أمام الشمس (سابقًا لها) على المدار البيضاوي، وفي أوقات أخرى يكون خلفها. وتسمى هذه الحركة التبادلية Alternate. فإذا كان الكوكب مباشرة إلى الغرب من الشمس، فإن الدوران اليومي سيأتي به إلى مجال رؤيتنا كنجم الصباح، أما إذا كان مباشرة إلى الشرق من الشمس، فإنه سيُرى كنجم المساء مباشرة بعد غروب الشمس. (كانت الشمس والقمر يعتبران من الكواكب، إلا أنهما لم يظهرا حركة تراجعية، أو الدرجة نفسها من تغيرات السرعة التي تبديها الكواكب الأخرى. وفي هذا الكتاب لا تسري كلمة كوكب على الشمس أو القمر.) ونظرًا لسرعات الكواكب المتغيرة، يظهر في بعض الأوقات كوكبان متقاربان جدًّا، وهو حدث يسمى أحيانًا الاقتران Conjunction. وقد أبدى المنجمون والعرافون القدماء الذين كانوا يبحثون عن إشارات في السماوات اهتمامًا ومنحوا مغزى كبيرًا للاقتران كنذير لحدث أو أمر خطير للبشر. وكان من الأندر (ونذيرًا أكثر) الاقتران المزدوج، عندما يظهر ثلاثة كواكب متقاربة. (ولكلمة اقتران معنى مختلف في الاستخدام الفلكي الحالي، ومناقشة ذلك تقع خارج مجال هذا الكتاب.)

وعلى مدى قرون، أبدت الحضارات الكبرى اهتمامًا كثيرًا بمظهر السماوات. وقد استخدمت مشاهد السماوات تلك في صياغة تقاويم ضرورية للحكم في الإمبراطوريات الشاسعة، ولتسجيل الأحداث الهامة في العلاقات البشرية. كذلك كانت هذه المشاهد هامة في السفر إلى أماكن بعيدة، لأن الملاحين استطاعوا تحديد مواقعهم بواسطة مشهد السماوات في مواقعهم الخاصة. وفي الحقيقة، لعبت الحسابات واستخدام الجداول الملاحية الدقيقة دورًا هامًّا في استكشاف العالم بواسطة الأمم البحرية، وكذلك في قدرتها على الإقدام على المغامرات التجارية وإرسال البعثات الحربية. وحتى القرون القليلة الأخيرة، كان للتنبؤات التنجيمية القائمة على مشاهد السماوات عمومًا أو على بعض الأحداث غير العادية مثل الاقتران أو ظهور مذنب أو مستعر أعظم؛ كان لها تأثير واسع النطاق على صناعة القرار السياسي، وما زالت الأبراج لها شعبية غريبة.

أسس البابليون واحدة من أعظم حضارات بلاد ما بين النهرين. وقد قام الفلكيون عندهم بقياسات وحسابات للمشاهد السماوية. وكانوا معنيين أكثر بالدقة والثقة في قياساتهم الفلكية وفي تنبؤاتهم، أكثر من تطوير فهم الإجابة عن أسئلة لماذا، ومن أجل أي شيء يقوم العالَم بعمله.

والإغريق على الرغم من اهتمامهم بالدقة والثقة في معرفة السماوات، لم يطوروا القياسات البابلية بشكل مؤثر. وقد جاءت مساهمات الإغريق في علم الفلك من اهتمامهم بالمناطق التي يمكن أن يوجد بها الكمال، لأن الطبيعة الحقيقية للسماوات هي الكمال. وقد شعروا أن مشاهد السماوات يجب أن تفهم بمدلول الكمال الكامن فيها والمستقر. فالشمس والقمر يبدو أن لهما شكلًا «تامًّا» — دائريًّا. كما أن حقيقة كون الحركة اليومية للنجوم تؤدي إلى حركة دائرية كانت ملائمة؛ لأن الدائرة تمثل الشكل التام، كما رأينا من قبل.

وعلى الرغم من أن تفاصيل حركة الكواكب بدت أبعد من أن تكون ناعمة ودائرية، فإنه في المتوسط كانت الحركة دائرية. لذلك كان من المؤكد أن الطبيعة الرئيسية لحركتها دائرية، أما البعد عن الحركة الدائرية الذي لوحظ فكان يمثل فقط ظلال الواقع الحقيقي كما يفهم من رواية أفلاطون «الكهف». أخذ الفلاسفة الإغريق دعوة أفلاطون «للحفاظ على المَشاهد» بجدية ليفسروا كل حركات الأجرام السماوية بمدلول الحركة الدائرية. وبالمصطلحات الحديثة، فقد تصدوا لتطوير نموذج للكون الذي يمكن أن يفسر كيف «يعمل في الواقع».

كثير من الحضارات القديمة طورت نماذج للعالم. فكان المصريون يعتقدون أن العالم مثل صندوق مستطيل طويل، والأرض محدبة قليلًا وتستقر على قاع الصندوق، بينما السماء سقف حديدي مقوس قليلًا ومعلق فيها مصابيح. وهناك أربع قمم للجبال تحمل هذا السقف، وتتصل بينها وصلات من الجبال، ويجري خلفها نهر عظيم، وكانت الشمس إلهًا يسافر في قارب خلال هذا النهر، ولا يمكن رؤيته إلا في ساعات ضوء النهار.

أما النماذج التي كانت لدى الإغريق في وقت متأخر كثيرًا عن ذلك، فكانت أكثر تطورًا من هذا، وتعكس معرفة أكثر بشكل ملحوظ. إذ وضعوا في اعتبارهم نوعين من النماذج، نموذج مركزية الأرض أو وجود الأرض في المركز، ونموذج مركزية الشمس أو وجود الشمس في المركز. وفي نماذج مركزية الأرض كانت الأرض (بالإضافة إلى كونها مركز الكون) عادة ساكنة مستقرة. أما في نماذج مركزية الشمس، فكانت

الأرض تدور حول الشمس أو حول نار مركزية، مثل بقية الكواكب الأخرى، وكانت عادة تدور حول محورها الخاص. وعلى الأغلب كان الإغريق يفضلون نماذج مركزية الأرض ويرفضون نماذج مركزية الشمس.

وفي أحد أبسط نماذج مركزية الأرض، كانت الأرض كرة صغيرة بلا حركة ومحاطة بثمان كرات متحدة المركز دوارة تحمل القمر، والشمس، والزهرة، وعطارد، والمريخ، والمشتري، وزحل، والنجوم الثابتة على التوالي. ولأن الكرات كلها لها المركز نفسه، فإن هذا النموذج يدعى منتظم المركز homocentric. ويرافق هذه الكرات الثماني عدد من الكرات المساعدة الأخرى. (ينسب هذا النموذج إلى إيودوكسوس Eudoxus أحد تلاميذ أفلاطون، الذي أخذ على عاتقه تحدي معرفة الواقع الحقيقي.) كان لكل من القمر والشمس كرتان مساعدتان، وللكواكب ثلاث كرات مساعدة لكل منها. وبإحصاء الكرات السماوية، يصل عددها الكلي إلى سبع وعشرين كرة.

والغرض من الكرات المساعدة هو المساعدة في توليد الحركة المشاهدة. فمثلًا تدور الكرة التي تحمل القمر حول محور، طرفاه ملتصقان بالكرة الأكبر التي تحمل القمر حول محوره، طرفاه ملتصقان بالكرة الأكبر التالية، بحيث يمكن لمحور دوران كرة القمر نفسه أن يدور مع الكرة المساعدة. وبدوره يلتصق محور الكرة المساعدة بالكرة المساعدة التالية، التي تدور هي الأخرى. وبوضع هذه المحاور بزوايا مختلفة بعضها مع البعض، وتعديل سرعات الدوران للكرات، من الممكن توليد حركة الأجرام السماوية بحيث يدركها الملاحظ على الأرض، على خلفية النجوم الثابتة، وهي تتبع مسارًا ملائمًا على طول المدار البيضاوي.

وفي النسخ الأولى لهذا النموذج، كان السؤال حول كيفية وصول الكرات إلى حركاتها مهملًا. وكان المفترض ببساطة أن طبيعة الكرات التامة في السماوات أنها لا بد أن تدور. وكان الغرض من النموذج ببساطة أن يفسر عدم انتظام حركة الأجرام السماوية على أنها مرافقات لحركة دائرية منتظمة، وبذا «تحفظ المَشاهد» حتى إن أي شخص يبدي استغرابًا حول أسباب الحركة، فكان يقال إنها راجعة إلى «أسباب» مختلفة. وفي ذلك الوقت نحى الفلاسفة الإغريق جانبًا بشكل أو بآخر التفسيرات الأسطورية، مثل الآلهة التي تدفع عربة النار عبر السماء، وغيرها.

تبنى الفيلسوف العظيم أرسطو (٣٢٢–٣٨٤ق.م) النموذج منتظم المركز للعالم، وأضافه بتمكن ليتكامل مع المنظومة الفلسفية، مبينًا علاقته بالفيزياء والميتافيزيقيا. وقد اعتبر العالم كرويًّا وقسمه إلى «عالمين»: العالم الفلكي (أو السماوي)، والعالم

أسفل القمر Sublunar. كان العالم تحت القمري مكونًا من أربعة مواد أولية: الأرض والماء والهواء والنار. بينما كان العالم الفلكي يحتوي على المادة الخامسة، الأثير. كان لهذه المواد خصائصها الدفينة الموروثة. وتتحدد قوانين الفيزياء بالطبيعة الدفينة الموروثة لهذه المواد، ولذلك تختلف قوانين الفيزياء في العالم تحت القمري عن القوانين في العالم الفلكي. وكان فهم أرسطو للفيزياء مختلفًا تمامًا عن فهمنا للفيزياء اليوم، إلا أنها كانت مترابطة مع مجمل منظومة الفلسفة. (سنناقش مفهوم أرسطو في الفيزياء بالتفصيل في الفصل التالي).

لم يكن أرسطو مقتنعًا بالوصف البسيط لحركة الكواكب التي اقترحها يودوكسوس، لأنه في مخطط يودوكسوس كانت حركة المجموعات المختلفة للكرات مستقلة عن بعضها. وقد شعر أرسطو بالحاجة إلى ربط حركة الأجرام السماوية فيما بينها في منظومة واحدة شاملة، ولذا فقد أدخل كرات إضافية بين المجموعات المخصصة لكواكب معينة. فمثلًا، كان للكرة الخارجية المساعدة الأبعد في المجموعة التي تنتمي إلى زحل؛ محورًا ملتصقًا بكرة النجوم الثابتة. وعلى الكرة الداخلية لزحل كانت مجموعة من الكرات الإضافية ملتصقة بها، وكان يطلق عليها الكرات المضادة، وتتكون من ثلاث كرات كانت تدور بطريقة معينة بحيث تلاشى التفاصيل الدقيقة لحركة زحل. وعلى الكرة الداخلية من بين هذه الكرات المضادة كانت تلتصق الكرة المساعدة الخارجية التي تنتمي إلى المشتري. وبالمثل تم إدخال مجموعات من الكرات المضادة بين المشتري والمريخ، وهكذا.

كان عدد الكرات الكلي في مخطط أرسطو ستًّا وخمسين كرة. وكانت الكرة الخارجية تسمى المحرك الأول، لأن كل الكرات الأخرى كانت مربوطة إليها وتستمد حركتها منها. ولم يحدد أرسطو بالتفصيل كيف تنتقل الحركة في الحقيقة من كرة إلى أخرى. وفيما بعد افترض الكُتاب أنه بشكل أو بآخر كانت كل كرة تسحب الكرة التي تليها إلى الداخل مع بعض التفويت. وبعد العديد من القرون كانت تبنى نماذج عمل لتصوير هذه الحركة، مع استعمال التروس كضرورة لنقل الحركة.

وسرعان ما اعترفوا بوجود بعض الضعف في النظرية الهندسية البسيطة التي ناقشها أرسطو. فقد كان حجم القمر المقاس مثلًا، يتفاوت في حدود من ثمانية إلى عشرة بالمائة في الأوقات المختلفة للملاحظة. وبالمثل كانت الكواكب تختلف درجة سطوعها، بحيث تكون أكثر لمعانًا بالتحديد عند خضوعها للحركة التراجعية. كانت هذه الظواهر تفرض تغير المسافة بين الأرض والكواكب أو بين الأرض والقمر، إلا

أن ذلك مستحيل في المنظومة منتظمة المركز. ونتيجة لانتصارات الإسكندر الأكبر، كان الأكثر أهمية أن أصبح الإغريق على دراية بالكم العظيم من البيانات الفلكية التي تراكمت بواسطة البابليين تحديدًا. وقد اكتشفوا أن نموذج أرسطو لا يتوافق مع هذه البيانات. وبذا أصبح من الضروري تعديل نموذج أرسطو، الأمر الذي جرى على مدى عدد من مئات السنين.

كانت ذروة هذه التعديلات قد وقعت منذ حوالي ١٨٠٠ سنة، أي سنة ١٥٠ تقريبًا، عندما نشر الفلكي الهليني بطليموس في الإسكندرية بمصر، رسالة مستفيضة بعنوان: «التركيب العظيم» The Great Syntaxes، عن حسابات حركة الشمس والقمر والكواكب. ومع تدهور الدراسات الدنيوية الذي صاحب انهيار الإمبراطورية الرومانية، فقد هذا العمل مؤقتًا بواسطة العالم الغربي. إلا أنه كان قد ترجم إلى العربية وأعيد عرضه في نهاية المطاف في أوربا تحت عنوان الماجستي The Majestic—The Great—Almagest.

تخلى بطليموس عن محاولة أرسطو ربط حركات الشمس والقمر والكواكب ببعضها، رافضًا الفيزياء كأمر تخميني أكثر مما ينبغي. وقد شعر بأنه يكفي تطوير مخططات رياضية للحساب الدقيق للحركات السماوية دون إبداء الاهتمام بالأسباب. كانت الخاصية الوحيدة للحكم على جودة أو صحة مخطط معين للحسابات هو أنه لا بد أن يقدم نتائج مضبوطة، و«يحفظ المَشاهد» وكان من الضروري فعل ذلك لأن البيانات المتاحة قد بينت أن مشاهد السماوات كانت تتغير بالتدريج. وحتى يمكن إرساء التقاويم والجداول الملاحية، كان من المهم امتلاك حسابات دقيقة، دون النظر إلى كيفية تبرير الحسابات.

وهنا، استغل بطليموس عددًا من التصميمات (كما كانت تسمى التعديلات) التي اقترحها فلكيون آخرون، وكذلك بعض تصميماته الخاصة. ومع ذلك، فقد احتفظ بمفهوم الحركة الدائرية. ويبين شكل ٢-٥(أ) أحد هذه التصميمات، المنحرف المركز eccentric. ويعني ذلك ببساطة أن الكرة التي تحمل الكوكب ليست متمركزة بعد الآن في مركز الأرض — فهي تبعد قليلًا عن المركز — لذلك ففي جزء من حركته يكون الكوكب أقرب إلى الأرض أكثر من بقية الأوقات. وعندما يكون الكوكب أقرب إلى الأرض، فسيبدو كأنه يتحرك أسرع. ويسمى مركز الكرة منحرفًا eccentric. وقد جعل بطليموس المركز المنحرف في بعض حساباته، يتحرك ولو ببطء.

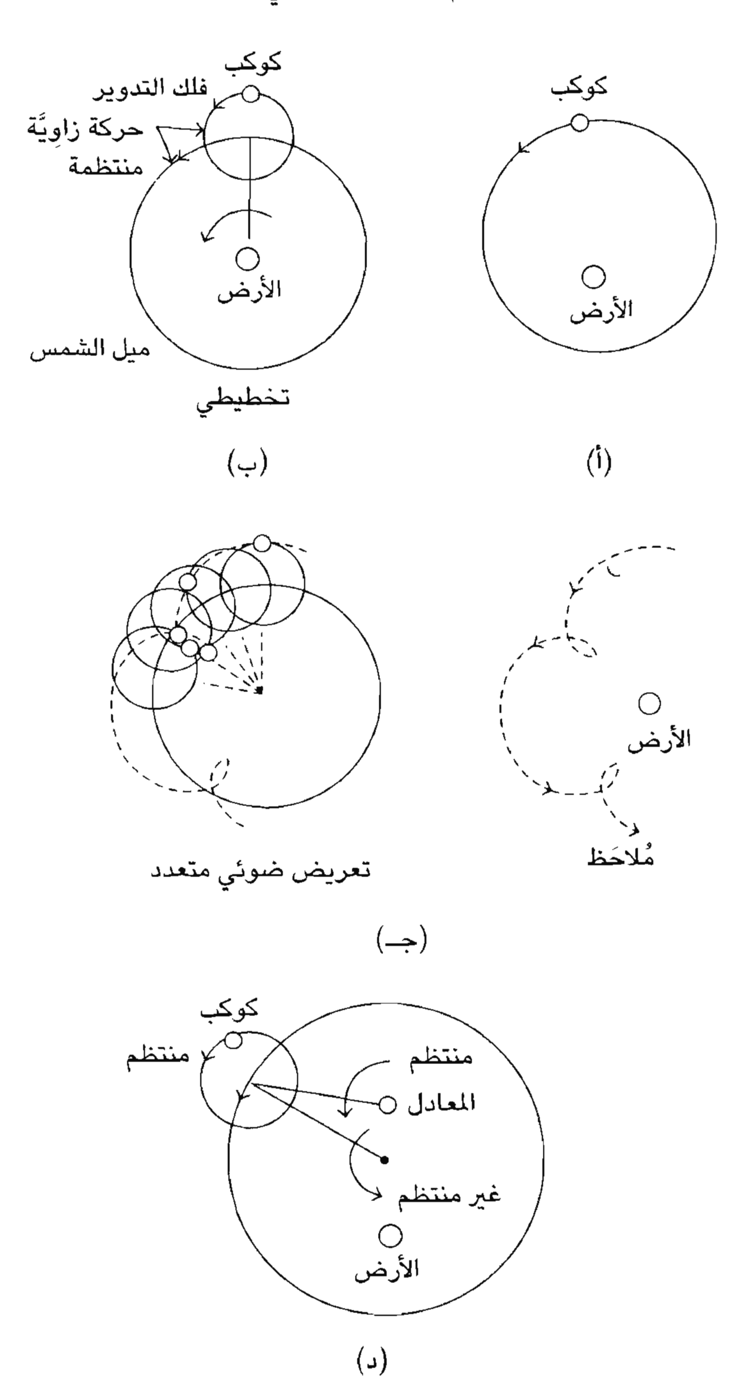
يبين شكل ٢-٥(ب) فلك تدوير epicycle، الذي هو كرة يتحرك مركزها حول كرة أخرى أو يُحمل عليها، تسمى الناقل Deferent. ويحمل الكوكب نفسه على



كلاوديوس بطليموس Claudius Ptolemay
(أرشيف بيتمان).

فلك التدوير. ويدور فلك التدوير حول مركزه، حيث يحمل المركز بواسطة الناقل. وقد يكون مركز الناقل نفسه في مركز الأرض — أو على الأرجح يكون منحرفًا هو الآخر. وتبعًا للحجم النسبي والسرعة لفلك التدوير وحركة الناقل، فإن المسارات التي يتبعها الكوكب قد تكون من أي نوع تقريبًا. وكما هو مبين في شكل ٢-٥(جـ)، يمكن أن تتولد الحركة التراجعية، ويصبح الكوكب أقرب إلى الأرض بينما يعاني من الحركة التراجعية. ومن الممكن استخدام تزاوج فلك التدوير وحركة الناقل في توليد دائرة منحرفة المركز أو شكل إهليلجي يقترب من الشكل البيضاوي (القطع الناقص)، أو حتى تقريبًا مسارًا مستطيلًا rectangular. (من الممكن رؤية حركة الأفلاك التدويرية مثل تلك الموجودة في بعض الملاهي، حيث المقاعد مثبته على منصة دوارة وهي بدورها مثبتة من نهايتها بذراع طويلة دوارة. والطرف الآخر للذراع مرتكز ويمكنه الحركة، راجع شكل ٢-٦).

وليس كافيًا للأغراض الفلكية توليد شكل محدد للمسار. بل من الضروري كذلك أن تنتقل الأجرام السماوية على طول المسار بسرعة مناسبة: أي لا بد أن تبين الحسابات أن الكوكب يصل إلى نقطة ما في السماء في الوقت المضبوط. وفي الحقيقة، أصبح من الضروري إما أن نجعل الكوكب على فلك التدوير أو نجعل مركز فلك



شكل ٢-٥: تصميمات استخدمها بطليموس في نموذجه لمركزية الأرض (أ) المركز المنحرف. (ب) حفظ فلك تدوير على ناقل. (جـ) توليد حركة تراجعية بواسطة فلك دوار. (د) نموذج بطليموس إيكوانت equant.



شكل ٢-٦: ملاهٍ تتضمن أفلاك تدوير (تشارلز جبتون/ستوك بوسطن).

التدوير على الناقل يسرع أو يبطئ. وبذا أصبح من الضروري إدخال تصميم آخر اسمه إيكوانت equant، كما هو مبين في شكل ٢-٥(د). لاحظ أن الأرض تقع في جانب من المركز المنحرف، والإيكوانت على مسافة مساوية في الجانب الآخر من المركز المنحرف. وكما هو واضح من الإيكوانت، يتحرك مركز فلك التدوير حركة زاوية منتظمة، وبذلك يحفظ مشاهد الحركة المنتظمة. وتعني الحركة الزاوية المنتظمة أن خطًّا يصل بين الإيكوانت ومركز فلك التدوير سيدور بسرعة عدد ثابت من الدرجات في الساعة، مثل عقرب الساعة. ومع ذلك، فإن الحركة الزاوية المنتظمة بالنسبة للإيكوانت هي ليست حركة منتظمة على طول محيط الدائرة. لأن طول الخط من الإيكوانت إلى الكوكب يتغير، وتتغير السرعة على طول محيط الدائرة (مثلًا بالأميال في الساعة) متناسبة مع طول الخط.

استغل بطليموس هذه التصميمات منفردة أو مجمعة، كلما دعت الحاجة، لحساب مواقع الكواكب. وقد استخدم أحيانًا أحد التصميمات لحساب سرعة القمر مثلًا، واستخدم تصميمًا آخر لحساب مواضع الكواكب. ولم يكن بطليموس معنيًّا باستخدام مجموعة متسقة من التصميمات في الوقت نفسه معًا، فيما يخص جميع السمات لحركة جرم سماوي واحد. وكان اهتمامه الرئيسي منصبًّا على حساب الموقع الصحيح وأوقات ظهور الأجسام السماوية المختلفة. وفي هذا الصدد، فإنه كان مثل

الطالب الذي يعرف إجابة المسألة؛ ولذا فهو يبحث عن المعادلة التي تعطيه الإجابة الصحيحة دون أن يزعج نفسه فيما إذا كان لاستخدام تلك المعادلة أي معنى.

وقد حاول فيما بعد بعض الفلكيين وبعض المعلقين على منظومة بطليموس أن يجعلوا الحسابات تتفق مع منظومة فيزيائية معقولة. وهكذا تخيلوا أن أفلاك التدوير كانت تدور بالفعل حول الناقلات الخاصة بها. وكان ذلك يعني طبعًا، أن الكرات المختلفة لا بد أن تكون شفافة حتى نتمكن من رؤية الكواكب من الأرض. وبذا لا بد أن تكون الكرات مصنوعة من مادة تشبه الكريستال، وربما تكون الأثير الذي غَلُظَ قوامه. وكان من المعتقد أن الفضاء بين الكرات يمتلئ بالأثير، لأنه لم يكن أحد يؤمن بوجود الفراغ أو الفضاء الخالي.

ويرى العقل الحديث، أن منظومة بطليموس تبدو بعيدة التحقق، على الرغم من أنه في عصره وعلى مدى أربعمائة سنة بعده، كانت هي المنظومة الوحيدة التي توصلوا إليها، وكان لها القدرة على إنتاج جداول فلكية بالدقة المطلوبة لصناعة التقاويم والملاحة. ونكرر، كان هناك هدف واحد أولي في ذهن بطليموس هو: تطوير منظومة وتقنية رياضية تسمح بالحسابات الدقيقة. كانت الاعتبارات الفلسفية (كانت الفيزياء تعتبر فرعًا من الفلسفة) غير مناسبة لأغراضه. وباختصار، استخدم مخطط بطليموس على نطاق واسع للغرض البرجماتي المقنع الذي عمل له.

إحياء نظرية مركزية الشمس بواسطة كوبرنيكوس Copernicus

وفقًا لنظرية مركزية الشمس (الشمس في المركز)، فإن الشمس هي مركز حركة الكواكب، والأرض كوكب، مثل المريخ والزهرة، يتحرك في مسار حول الشمس، ويدور حول محوره. ومنذ أيام أرسطو، وربما قبل ذلك، كانت إمكانية دوران الأرض حول محورها محل اعتبار. حتى إن اقتراحًا قديمًا كان يقول بأن الأرض، مثلها مثل الشمس، تتحرك حول «نار مركزية». وقد رفضت هذه الأفكار، وسنناقش بعض الحجج المضادة لها فيما بعد. وقد ظن الإغريق عمومًا أن فكرة الحركة ودوران الأرض هي فكرة يتعذر الدفاع عنها، وكانت تعتبر فكرة عامة وخطيرة، ومن السخف تناول مثل هذه الأفكار.

ومع ذلك، وفي الجزء الأخير من القرن الرابع عشر، اقترح عدد قليل من الأفراد أن هناك بعض الصعوبات المنطقية في مفهوم العالم المتمركز حول الأرض؛ لأنه إذا كان دوران النجوم اليومي راجعًا إلى دوران الكرة السماوية، ونظرًا لحجمها المهول

وللنجوم الكثيرة الموجودة على الكرة السماوية؛ فإنها لا بد أن تتحرك بسرعة عالية وهذا أمر مستحيل. ويبدو أنه من المعقول افتراض أن الأرض الصغيرة فقط هي التي تدور، وأن الدوران اليومي هو ببساطة مجرد خداع بصري يعكس الحركة النسبية. وبعد بعض الوقت كان هناك اقتراح بأن خالقًا مطلقًا للكون قد جعله مطلقًا لانهائيًّا في الزمان والمكان، ولذا فإن أي مكان يمكن اعتباره المركز. كانت تلك مجرد تخمينات، ومع ذلك لم يتعرض أحد للحسابات التفصيلية الضرورية لدعم مثل هذه الاقتراحات حتى القرن السادس عشر، عندما قام أحد رجال الدين من صغار الرتبة في كاتدرائية فراونبرج Frauenberg (اسمها الآن فرومبورك Frombork في بولندا) بدراسة هذه المشكلة.

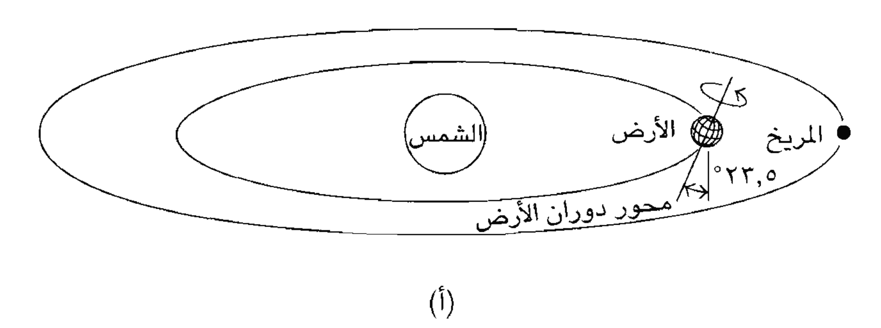
درس هذا الرجل، نيكولاوس كوبرنيكوس Nicolaus Copernicus في جامعات كراكوف Cracow في بولندا، وبولونيا Bologna وبادوا Padua في إيطاليا، حيث اكتسب معرفة جيدة في الرياضيات والفلك واللاهوت والطب والقانون والفلسفة الإغريقية. ولم تكن واجباته في الكاتدرائية تتطلب وقتًا كثيرًا، لذلك كان في مقدوره إجراء دراسة مطولة ومستفيضة في الفلك.

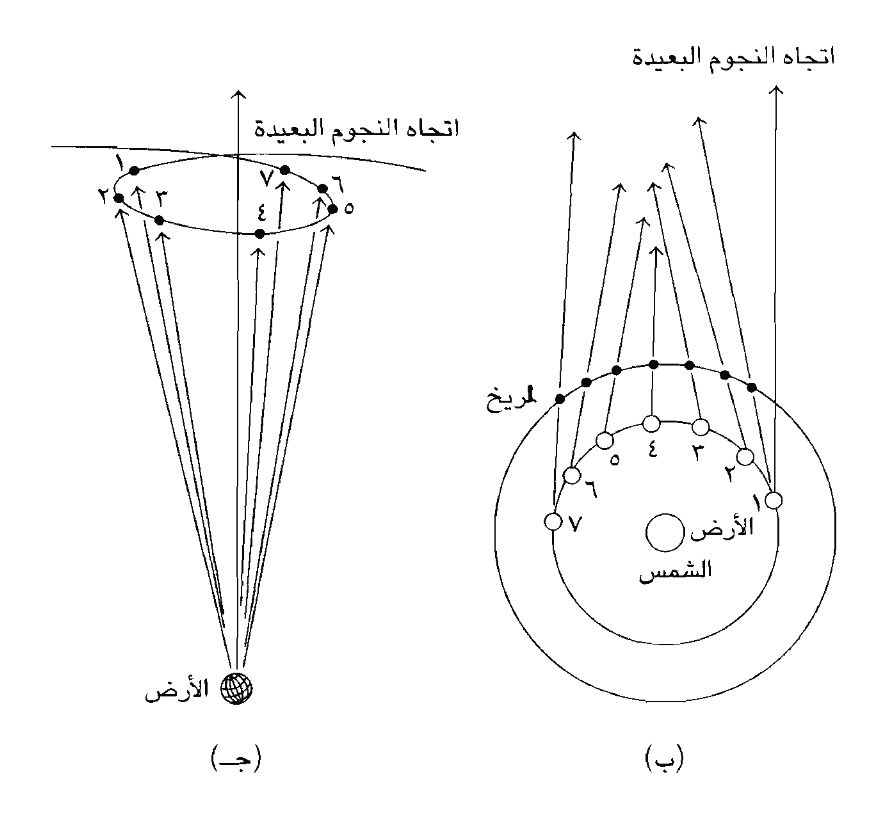
توصل كوبرنيكوس في النهاية إلى أن منظومة بطليموس كانت معقدة أكثر من اللازم. ويبدو الآن بوضوح أن كوبرنيكوس قد تأثر بالأفلاطونية الجديدة Neoplatonism، وهو استشراف فلسفي له جذور قوية في الفكر الإغريقي الكلاسيكي. وكانت هناك قاعدة متسقة مع هذا الاستشراف هي موسى أوكهام Ockham's razor، التي ينص جوهرها على أن التفسيرات الأبسط مفضلة على التفسيرات المعقدة. (وفي هذا الصدد، يقال إن الملك ألفونسو العاشر ملك كاستيل Castille، الذي مول سنة ١٢٥٢ حسابات جديدة للجداول الفلكية مستخدمًا تقنيات بطليموس مع بيانات إضافية؛ يقال إنه قد تذمر قائلًا إنه كان على الرب أن يستشيره قبل إرساء مثل هذا النظام المعقد.) كان كوبرنيكوس مستاءً من الطريقة غير المتسقة التي طبق بها بطليموس التصميمات المختلفة التي ناقشناها سابقًا. وقد اعتبر أن استخدام الإيكوانت بالتحديد متعارضًا مع فكرة الحركة الدائرية التامة نفسها. وقد أعاد اختيار نموذج مركزية الشمس لذلك، الذي كان قد اقترح منذ أكثر من ألف وخمسمائة سنة بواسطة أريستار خوس Aristarchus، الفلكي الإغريقي الذي عاش في زمن ما بين أرسطو وبطليموس.

اقترح كوبرنيكوس، متبعًا اقتراحات أريستارخوس، أن الشمس والنجوم الثابتة لا بد من اعتبارها ساكنة، وأن الأرض كوكب يعتبر هو الذي يدور حول الشمس بالشكل نفسه وفي الاتجاه نفسه مثل باقي الكواكب الخمسة. ولا بد أن يكون طول الوقت الذي يتطلبه دوران كوكب دورة كاملة حول الشمس أكبر كلما بعد الكوكب عن الشمس. وببساطة ليست الحركة التراجعية والإبطاء والإسراع في الكواكب إلا خداعًا بصريًّا، يحدث بسبب أن الاتجاه الذي يرى فيه أحد الكواكب من الأرض، يعتمد على المواقع النسبية للأرض والكواكب في مداراتها. وستتغير هذه المواقع النسبية مع الزمن بالطريقة نفسها التي تتبعها المواقع النسبية لسيارات السباق في سباق طويل حول حلبة سباق إهليلجية Oval. وسيسبق الكوكب السريع كوكبًا بطيئًا إلى أن يصبح الفارق طول حلبة كاملة، وسيمر بجوار الكوكب الأبطأ مرات ومرات. ولذلك، كما نشاهد من الأرض، فإن الكواكب الأخرى (أمامها وخلفها). ولا يعتبر الاقتران شيئًا خاصًّا أكثر من مشاهدة أحد الكواكب يتخطى كوكبًا آخر.

ويبين الشكل ٢-٧ تخطيطًا لكيفية حدوث الحركة التراجعية كما ترى من الأرض. ويبين الشكل ٢-٧(ب) المواقع النسبية للشمس، والأرض والمريخ في سبعة أوقات مختلفة. وتبين الأسهم الاتجاهات (مقارنة باتجاه نجم بعيد) التي على المشاهد من على الأرض أن ينظر إليها ليرى المريخ في تلك الأوقات. وفي الشكل ٢-٧(جـ) وضعت الاتجاهات المقابلة بعضها فوق بعض، كما تظهر للفلكيين أو لمن ينظر من الأرض في اتجاه المريخ. وقد عُدلت أطوال الأسهم لتناسب المسافات المتغيرة بين الأرض والمريخ في الأوضاع السبعة المختلفة. والنتيجة تفسير بسيط جدًّا «وطبيعي» للحركة التراجعية.

ولتفسير الدوران اليومي (الحركة اليومية diurnal motion)، اقترح كوبرنيكوس كذلك أن الأرض تدور حول محورها مرة كل ٢٣ ساعة و٥٦ دقيقة. (الدقائق الأربع الأخرى لتكملة الزمن الذي يكتمل فيه الدوران الظاهري للسماوات، وهي مطلوبة لأن الأرض قد تحركت إلى موقع مختلف في مدارها حول الشمس.) ومحور الدوران مائل بالنسبة لمحور المدار بمقدار الزاوية (٢٣,٥ درجة تقريبًا) التي تصنعها الدائرة الظاهرية لمدار الشمس مع خط الاستواء السماوي. (ويؤكد كوبرنيكوس بحزم كذلك أن هذا المحور المائل يدور ببطء شديد حول محور المدار محتفظًا بالزاوية نفسها لميله، وبذلك يفسر التغير البطيء جدًّا في المظهر الشامل للنجوم الثابتة، التي لوحظت منذ أيام بطليموس.)





شكل ٢-٧: نموذج كوبرنيكوس «مركزية الشمس» (أ) منظور تخطيطي للأرض والمريخ ودورانهما حول الشمس، يبين كيف تدور الأرض حول نفسها. (ب) المواقع النسبية للأرض والمريخ تبين الزوايا المختلفة للرؤية من الأرض في اتجاه المريخ (جـ) وضع زوايا الرؤية كما ترى من الأرض.

وفي الواقع، وجد كوبرنيكوس أنه بإزاحة وجهة النظر لحركة الكواكب من الأرض إلى الشمس، تصبح الحركات التي كانت تبدو معقدة جدًّا بسيطة جدًّا: لو تمكن أحد من الوقوف على الشمس فستظهر جميع الكواكب وهي تدور في مسارات دائرية،

وستكون الكواكب الأقرب إلى الشمس هي الأسرع. وعندئذ استنتج كوبرنيكوس من القياسات الفلكية، الترتيب الصحيح للكواكب حول الشمس، بادئًا بالأقرب: عطارد، والزهرة، والأرض، والمريخ، والمشتري، وزحل. وقد قام كذلك بحساب بعدها عن الشمس بدقة، فكانت الأرض على مسافة ٩٣ مليون ميل من الشمس.

بدأ إذن كوبرنيكوس في حساب كيف يمكن أن تبدو السماوات بدقة للفلكيين على الأرض. وبالتحديد قام بتقييم مشاهد الكواكب، والوقت والموقع، لمقارنتها بالقياسات الفلكية. واكتشف على الرغم من ذلك أن المواقع التي درسها تعطي نتائج أقل دقة من نظرية بطليموس! وبعبارة أخرى، كان مفهومه الجميل والأنيق، الذي كان يعمل جيدًا بطريقةٍ كيفية، قد فشل كميًّا.

أعاد كوبرنيكوس الشجاع إدخال بعض التصميمات التي استخدمها بطليموس: المركز المنحرف، والناقل، وفلك التدوير (لكن دون الإكوانت، الذي يزدريه). وفوق ذلك، ولدى إدخاله لهذه التصميمات، فإنه طبقها تطبيقًا أكثر اتساقًا بكثير جدًّا مما كان ممكنًا باستخدام طرق بطليموس. وقد استخدم كذلك عددًا أقل جدًّا من الكرات من مختلف الأنواع: ستًّا وأربعين، مقارنة بأكثر من سبعين استُخدمت في بعض حسابات من النوع البطلمي مؤخرًا.

جاءت نتيجة كل ذلك الجهد جداول فلكية لم تكن أفضل عمومًا من الجداول الفلكية المحسوبة باستخدام نظرية مركزية الأرض وطرق بطليموس. كانت هناك ميزة واحدة لمنهج كوبرنيكوس، طالما كان الفلكيون العمليون هم موضع الاهتمام: كانت الحسابات أبسط إلى حد ما في إجرائها.

أكمل كوبرنيكوس عمله سنة ١٥٣٠، إلا أنه لم ينشره بكل تفاصيله عدة سنوات، ربما خوفًا من ردود الأفعال التي قد يتسبب فيها؛ فقد ازْدُري بعنف المناصرون الأوائل لفكرة أن الأرض في حركة. وأخيرًا في سنة ١٥٤٣، وفي اليوم الذي توفي فيه، ظهر كتابه «عن دوران الكرات السماوية» on the Revolutions of the Heavenly Spheres. وكان مهدى إلى البابا بول الثالث، وقد جاء في مقدمته (التي كتبها شخص آخر) أن مخطط كوبرنيكوس يجب ألا يؤخذ على أنه يمثل الواقع، ولكن يعتبر ببساطة طريقة مفيدة لحساب مواقع الأجسام السماوية. وقد استخدمت منظومة كوبرنيكوس وحساباته في تحديد التقويم الجريجورياني، الذي أدخل أول مرة سنة ١٥٨٢، وما زال هو المستخدم حتى اليوم.

كان رد الفعل الأول على مخطط كوبرنيكوس يمكن اعتباره إلى حد بعيد متفقًا مع المقدمة: مفيد في الحسابات لكن ليس بالضرورة له علاقة بالواقع. كان كوبرنيكوس على دراية بالاعتراضات العديدة على نظرية مركزية الشمس أو أي نظرية تتضمن حركة الأرض منذ أن أثيرت مبكرًا في أيام الإغريق القدماء. وقد حاول في كتابه أن يفند هذه الاعتراضات التي يمكن تقسيمها إلى فئتين: (١) الاعتراضات العلمية. و(٢) الاعتراضات الفلسفية والدينية. وقد كان للفئتين الأهمية نفسها في أذهان معظم معاصريه.

كانت بعض الاعتراضات العلمية قائمة على المشاهدات الفلكية. فمثلًا، إذا كانت الأرض تدور بالفعل في مدار دائري حول الشمس، فإن المسافة بين الأرض إلى قسم محدد من خط استواء الكرة السماوية لا بد أن تختلف بمقدار ١٨٦ مليون ميل (قطر مدار الأرض). أما الفصل الزاوي بين نجمين متجاورين على الكرة فلا بد أن يتغير بوضوح، كما يتغير الفصل الزاوي بين شجرتين في غابة اعتمادًا على مدى قرب الشخص من الأشجار. ولم يلاحظ أبدًا التغير في الموقع الظاهري للنجوم (Star parallax) وأكد كوبرنيكوس بحسم أن النجوم كانت بعيدة جدًّا حتى إن التغير بمقدار ١٨٦ مليون ميل لم يكن سوى جزء صغير من التغير في المسافة الكلية من الأرض إلى النجوم حتى إن التغير في الموقع الظاهري سيكون أصغر من أن ترصده عين الإنسان. رفض منتقدوه هذا الرأي لأنهم كانوا يعتقدون أن الكرة السماوية كانت أكبر قليلًا من كرة زحل. (وفي الحقيقة، فإن أقرب النجوم بعيد جدًّا حتى إن التغير في الموقع الظاهري لم يشاهد إلا بعد قرنين من الزمان، عندما أتيحت تلسكوبات قوية قوة كافية.)

وكانت هناك اعتراضات أخرى لها علاقة بالأمر تتضمن الحجم الظاهري للنجوم. فعندما تُرى بالعين المجردة، يبدو أن كل النجوم لها القطر الظاهري نفسه لأنها بعيدة جدًّا. أما إذا حسبت أقطارها الحقيقية باستخدام المسافات من الأرض إلى النجوم التي أكدها كوبرنيكوس فسيتضح أنها عدة مئات الملايين من الأميال، وبذلك فهي أكبر كثيرًا من الشمس، وهو أمر شديد الغرابة كي يصدقه الناس. وكما اتضح فإن الحجم الظاهري للنجوم كما ترى بالعين المجردة مضلِّل من حيث كبره؛ بسبب الطبيعة الموجية للضوء وصغر فتحة العين النسبي، ولم يكن ذلك مفهومًا إلا بعد ٣٠٠ سنة، عندما تم التعامل مع مبادئ تشتت الضوء. (في الحقيقة، تبدو النجوم أصغر من خلال التلسكوب عنها عندما ترى بالعين المجردة!)

وكانت هناك كذلك اعتراضات قائمة على الفيزياء، كما كانت تفهم في ذلك الوقت. كان ذلك الفهم قائمًا أساسًا على كتابات أرسطو. مثلًا، من المؤكد أنه لو كانت الأرض تتحرك فعلًا، لكان لا بد لقاطنيها أن يشعروا بنسيم يتناسب مع سرعة الأرض، تمامًا مثل ما يشعر الشخص الذي يركب مركبة مفتوحة بالنسيم، وسرعة الأرض أثناء حركتها حول مدارها حوالي ٦٧٠٠٠ ميل في الساعة، وبالتأكيد كان «النسيم» الناتج سيدمر أي شيء على سطح الأرض. (العاصفة التي تزيد بها سرعة الرياح عن ٧٥ ميلًا في الساعة تعتبر إعصار هوريكان hurricane.)

وبالمثل، كان الادعاء بأن الأرض لو كانت تتحرك، فإن التفاحة التي تسقط من الشجرة لن تسقط في خط مستقيم إلى أسفل نحو الأرض، ولكنها ستسقط مبتعدة عدة أميال، لأن الشجرة والأرض من تحتها ستتحركان هذه المسافة خلال الزمن الذي تقطعه التفاحة لتصل إلى الأرض. وفي هذا الصدد، كم عدد الأحصنة (بالمصطلحات الحديثة، كم ستكون الآلة كبيرة) المطلوبة لتشد شيئًا في كتلة الأرض بهذه السرعة المذهلة؟ ولا يوجد أي دليل على العامل الذي يجعل الأرض تتحرك. وبالطريقة نفسها في التفكير المنطقي، فإن دوران الأرض حول محورها مثل أرجوحة دوامة الخيل merry-go-round لا بد أن يجعل قوة الطرد المركزي كبيرة بحيث يصبح القاطنون كلهم معلقون، وتصبح الحياة مدهشة. ولأنه لا يحدث شيء من هذا كله، كان من الصعب تصديق أن الأرض تتحرك حقيقة. (فكرة أن الأرض يمكن أن تمارس قوى جاذبية لم تتطور إلا بعد قرن من الزمان، كما كان هناك تمايز بين قوى الطرد المركزي وقوى الجذب المركزي.) وقد تغلب أنصار منظومة كوبرنيكوس على هذه الاعتراضات العلمية (راجع الفصل التالي)، إلا أن ذلك استغرق منهم حوالي قرن من الزمان.

وكان للاعتراضات الفلسفية والدينية الوزن نفسه. ولم تكن تحظى الفيزياء في ذلك الوقت بالاحترام الطاغي الذي تلقاه اليوم. وفي الحقيقة، كان يعتبر اللاهوت ملكَ العلوم. وقد تكاملت الفلسفة الأرسطية داخل العقيدة الدينية في أوربا الغربية في القرن السادس عشر. ومن المثير جدًّا، أنه منذ ألف سنة كانت وجهة نظر أرسطو ملعونة كشيء وثني، وفكرة أن الأرض كرة تعتبر هرطقة. ومع ذلك، ففي أيام كوبرنيكوس، سادت وجهة نظر أرسطو، التي كانت منطقية وعقلانية، وكان أي خطأ فيها يعتبر خطأ في كل النظام المقبول للأشياء. وكانت الأرض تعتبر متفردة وفي مركز العالم، وكذلك كان الإنسان.

وفي الفكر الأرسطي كانت الأرض والمنطقة المحيطة بها تحت القمر، حتى مدار القمر، تعتبر غير تامة. أما القمر والشمس والكواكب والنجوم فكانت تعتبر تامة لأنها في السماوات (وذلك هو السبب في أن حركتها دائرية)، إنها أجسام تامة تتحرك حركة تامة موروثة ومتأصلة في طبيعتها. أما الأرض، فلأنها كانت في المنطقة تحت القمرية، فقد كانت مختلفة في طبيعتها عن الأجسام السماوية، ولا يمكن أن تكون كوكبًا مثل الكواكب الأخرى، ولذلك لا يمكنها أن تقوم بنوع الحركة نفسه مثل الكواكب. كما كانت هي الأخرى تعتبر مختلفة لأنها تمارس تأثيرات خاصة على سلوك الأفراد، وما زالت الشخصيات المتفردة حتى الآن توصف أحيانًا بأنها عطاردية أو مشتراوية، أو زحلية مثلًا، كسمات منسوبة إلى كواكب عطارد والمشتري وزحل.* كما أن نظرية مركزية الشمس تقلل من الجذب الصوفي لعلم التنجيم.

هاجم رواد الإصلاح البروتستانتي الألمان نظرية مركزية الشمس لأنها كانت على عكس القراءة الحرفية للإنجيل. ومن المؤكد أن الدور المركزي للشمس في النظرية يمكن أن يؤدي إلى العودة إلى الممارسات الوثنية الخاصة بعبادة الشمس. كان رد فعل السلطات الدينية للكنيسة الكاثوليكية في البداية واهنًا، لكنهم في النهاية قاموا هم أيضًا بلعن مركزية الشمس بوصفها هرطقة. وقد رأى بعض المؤرخين أنه لو كان كوبرنيكوس طور أفكاره منذ خمسين سنة، أي قبل بداية الإصلاح بمدة، فلربما لاقت هذه الأفكار تعاطفًا أكثر من الناس. ولكن أن تأتي — كما حدث بالفعل — وسط الصراعات اللاهوتية للقرنين السادس عشر والسابع عشر، فإنها بدت وكأنها تحدٍّ للسلطات الرسمية للكنيسة، التي طالما تبنت نظرة مختلفة للكون (أو تحدٍّ للإنجيل، من وجهة نظر البروتستانت)؛ تحدٍّ يجب محاربته. (شعر كوبرنيكوس والآخرون الذين أيدوا وجهة نظر مركزية الشمس، بأن هذه الفكرة يمكن أن تتلاقى مع الإنجيل وأن الشمس تمثل ببساطة بهاء ومقدرة الرب.)

وقد بدا أن التحدي أكثر شراسة لأنه قد أدى إلى تخمينات متوحشة، مثل تلك الخاصة بجيوردانو برونو Giordano Bruno، الراهب الذي نادى بعد خمسين سنة

*يمكن الدفع بأن مثل هذه المعتقدات غير متسقة مع العقلانية التي وضعتها الفلسفة الأرسطية، إلا أن عدم الاتساق كان موجودًا في جميع الحضارات. وفضلًا عن ذلك فقد اكتسبت أوربا العصور الوسطى معرفتها بالفلسفة الأرسطية ليس من النص الإغريقي الأصلي، بل من الترجمة اللاتينية للنسخ العربية. وقد أضاف المترجمون بالقطع أفكارهم الخاصة إلى النص الأصلي.

من وفاة كوبرنيكوس، بأنه إذا كانت الأرض مثل الكواكب، إذن لا بد أن تكون الكواكب مثل الأرض. وبالتأكيد هي مأهولة بالناس الذين مارسوا خبرة تاريخية ولاهوتية مماثلة للخبرات التي أصبحت معروفة على الأرض، بما في ذلك كل الأحداث المسجلة في الإنجيل. وقد أكد برونو أن العالم غير محدود ولا نهائي في اتساعه، وأن الشمس هي مجرد نجم صغير، وأن هناك منظومات كواكبية أخرى. أما تفرد الجنس البشري بعناية الرب له والخبرات والممارسات المتنوعة فقد أصبحت بذلك مفقودة. (وفي النهاية تم حرق برونو على الخازوق لأنه رفض أن يشجب وينكر تلك الهرطقة وغيرها.)

وبأخذ جميع الأمور في الاعتبار، وفي ضوء الاعتراضات المختلفة التي أثيرت ضد نظرية كوبرنيكوس، وحقيقة أنها بعد تنقيحها لم تعط نتائج أفضل من نظرية بطليموس، فقد بدا أنه لا يوجد سبب قوي لتفضيل نظرية كوبرنيكوس. أما ميزتها الرئيسية فيبدو أنها أكثر جاذبية لأذهان بعض الفلكيين وأنها تقدم حسابات أسهل. وهي مع ذلك، تعرض أكثر من مخطط محتمل «للحفاظ على المَشاهد»، وقد بلورت فكرة أن نظرية بطليموس لم تعد مقنعة بعد الآن. وقد حان الوقت لنظريات جديدة أفضل في الفلك.

بيانات جديدة ونظرية جديدة

كانت إحدى نقاط الضعف في أعمال كوبرنيكوس أنه استخدم كميات كبيرة من بيانات عتيقة، من المحتمل أن تكون غير دقيقة. ولم يقم هو نفسه إلا بعدد محدود من الملاحظات الفلكية. وفي سنة ١٥٧٦ بنى الفلكي الدانمركي تايكو براهي Tycho Brahe مرصدًا فلكيًّا على جزيرة بالقرب من كوبنهاجن تحت رعاية ملك الدانمرك. وكان براهي نبيلًا له مظهر مخيف (كان له أنف من الفضة نتيجة مبارزة)، إلا أنه كان ملاحظًا حريصًا ومدققًا، وكان قادرًا على قياس موقع كوكب أو نجم بدقة كافية، وقد قضى السنوات العشرين التالية في جمع عدد كبير من القياسات فائقة الدقة لمواقع الشمس والقمر والكواكب. وحيث كانت القياسات السابقة موثقة يعتمد عليها بدقة زاوية مقدارها ١٠ دقائق على القوس، فإن بيانات براهي كانت دقتها ٤ دقائق على القوس (هناك ٦٠ دقيقة في كل درجة). وحتى نحصل على فكرة عما يعنيه ذلك: إذا استخدمت مؤشرًا طوله ياردة واحدة لمشاهدة كوكب، فإن انحرافًا في نهاية المؤشر مقداره ١/٢٥ من البوصة سيعطي خطأ في قياس الزاوية مقداره ٤

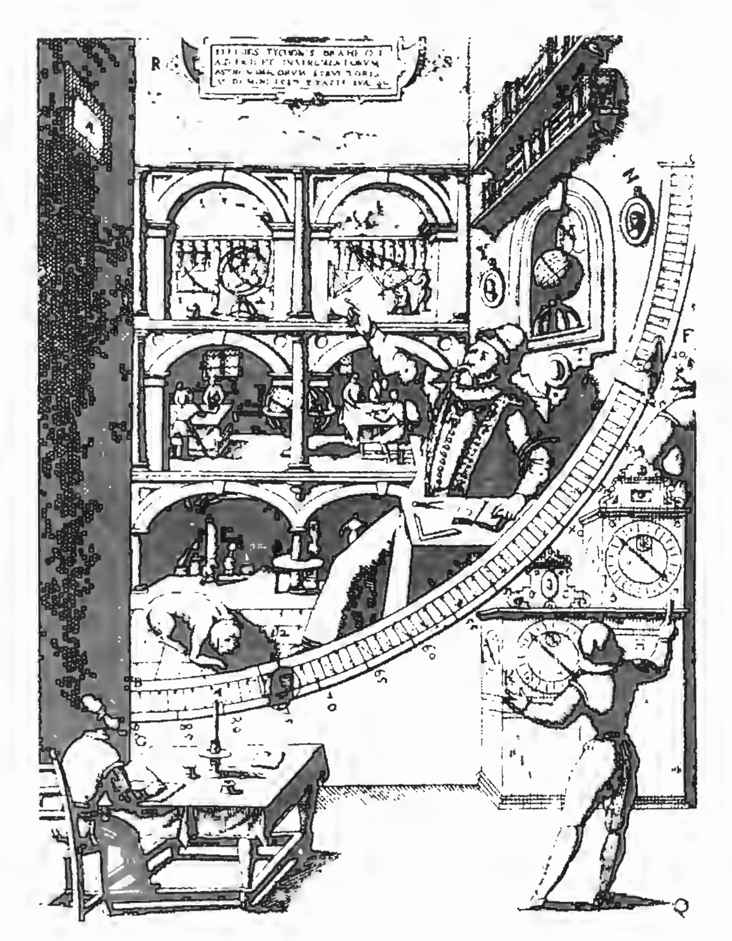


تايكو براهي
(مجموعة صور المكتبة العامة في نيويورك).

دقائق على القوس. وبينما كانت معظم الملاحظات السابقة ملتزمة بمشاهدة مواقع الكواكب في نقاط رئيسية معينة، فإن براهي قام بتتبعها على طول المدار كله. لم يقم براهي بملاحظاته باستخدام التلسكوب (الذي لم يكن قد اخترع حتى ١٦٠٨) ولكن باستخدام «أنابيب الملاحظة» المتنوعة وأجهزة مؤشرات اخترعها بنفسه.

وقد اكتشف براهي أنه لا نظرية كوبرنيكوس ولا نظرية بطليموس كانت تتفق مع بياناته الجديدة. وفي الحقيقة، كان يعلم أن كلًّا من النظريتين بها أخطاء جدية. وذلك قبل أن يبني مرصده بثلاث عشرة سنة. وقد شاهد اقتران المشتري مع زحل، وعندما راجع الجداول الفلكية اكتشف أن نظرية بطليموس قد تنبأت بحدوث هذا الاقتران بعد شهر، بينما تنبأت نظرية كوبرنيكوس بحدوثه بعد عدة أيام. كما أن تايكو براهي كان متأثرًا بالحجج المتنوعة ضد حركة الأرض، وكان قد تحقق من إمكانية تصميم نظرية أخرى قائمة على الحركة الدائرية التامة.

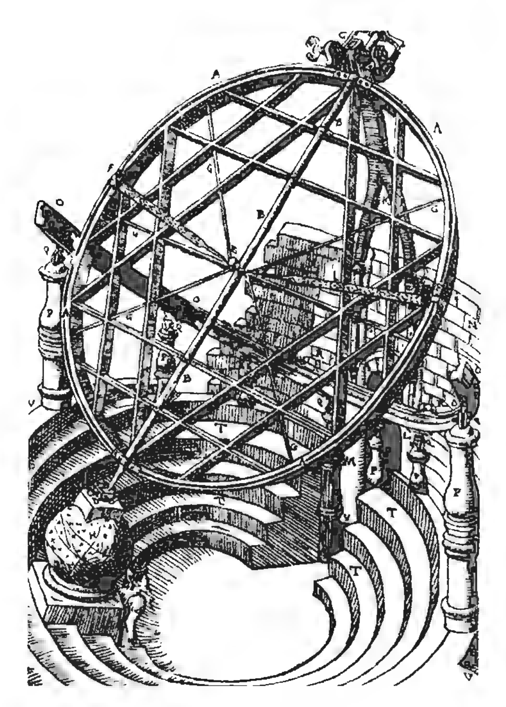
ولذا فقد اقترح براهي أن الأرض تقع في مركز كرة النجوم الثابتة وأنها ساكنة، وأن الشمس والقمر يسيران في مدارين حول الأرض. أما الكواكب الخمسة الأخرى



تايكو براهي في مرصده
(مكتبة نيلز بوهر AIP).

فقد كانت تسير في مدارات حول الشمس. وتسمى النظرية من هذا النوع، التي تظل فيها الأرض في مركز العالم، لكن الكواكب الأخرى تدور حول الشمس؛ بنظرية تايكو Tychonic. وفي نسخة نظرية تايكو براهي تدور المجالات الخارجية للنجوم وتكمل دورة واحدة كل أربع وعشرين ساعة لينتج عنها الحركة اليومية. وفي نظريات تايكو الأخرى، تكون كرة النجوم ثابتة بينما تدور الأرض حول محورها يوميًّا وهي في مركز الكرة.

- وقد أصبح نموذج تايكو مقبولًا بصفة عامة من قبل معظم الفلكيين في ذلك الوقت، وذلك لأنه احتفظ بشيء ما من الوحدة الذهبية لنظرية مركزية الشمس، والسهولة النسبية للحسابات في مخطط كوبرنيكوس، وفي الوقت نفسه تجنبت نظرية



سدسية (آلة السدس) — سكستانت Sextant — براهي لقياس مواقع الكواكب (مكتبة نيلز بوهر).

براهي كل الصعوبات الملازمة لحركة الأرض. وعلى الرغم من أن هذه النظرية قد أُبطلت بعد ذلك، فإنها متميزة لأنها تمثل الاعتراف بفشل نموذج بطليموس. لم يكمل براهي نظريته تمامًا، وعلى فراش موته كلف مساعده وتابعه ووريثه النهائي جوهانس كبلر Johannes Kepler بمهمة إجراء الحسابات التفصيلية الضرورية.

اكتشافات وحجج جديدة

كان كل من كوبرنيكوس وبراهي جزءًا من تقاليد راسخة ومستمرة في الفلك: ملاحظة وحساب موقع الأجسام السماوية. ومع ذلك بدءًا من أواخر القرن السادس عشر، بدأت فئات جديدة من المعلومات تلقى اهتمامًا واضحًا.

وفي عام ١٥٧٢ كان نجم جديد ساطع جدًّا يرى في أوربا الغربية، تلألأ هذا النجم وأصبح أكثر سطوعًا من أي نجم آخر، بل أكثر سطوعًا من الكواكب، وقد بينت المشاهدات الدقيقة بواسطة براهي وعدد آخر من الفلكيين أن هذا النجم كان بعيدًا جدًّا وثابتًا في موقعه مثل أي نجم آخر. كما تمت رؤية نجم آخر مماثل سنة

١٦٠٤، ويسمى مثل هذا النجم مستعر Nova وهو ليس شائعًا. وقد شوهد مذنب سنة ١٥٧٦ يتحرك عبر السماوات وراء المجال القمري، وفي اتجاه يدل على أنه لا بد قد اخترق عددًا من الكرات الكوكبية.

وقد سجلت مثل هذه الأحداث في سجلات الفلكيين الإغريق، إلا أن نوعية الملاحظات كانت وكأنها قد وقعت في تفكيرهم في المنطقة تحت القمرية. وكانت الملاحظات في الأعوام ١٥٧٢، ١٥٧٦، و١٦٠٤ تحديدًا لها مغزى؛ فقد بينت بوضوح أن الظواهر تحدث في العالم الفلكي أو السماوي. ويعنى ذلك أنه حتى السماوات تعاني من التغير. وإذا كانت السماوات تتغير، فإنها لا يمكن أن تكون تامة — وإلا ماذا قد يكون السبب؟ ومع ذلك، وتبعًا لفيزياء أرسطو، فإن الحركة الدائرية كانت محفوظة في السماوات لأنها تامة، بينما لا يمكن أن تكون الأرض دائرية في حركتها لأنها غير تامة. إلا أن المشاهدات الجديدة قد اقترحت أن السماوات ليست تامة، ولذا ليس هناك سبب يجعل حركة الأرض تختلف عن حركة الكواكب.

كانت ملاحظات المستعرات والمذنبات مجرد البداية لعدد كبير من الملاحظات الجديدة من نوع مختلف كيفيًّا. اخترع التلسكوب في ١٦٠٨، وكانت النية أن يستخدم في الأغراض العسكرية، لكن في ١٦٠٩ استخدم رجل إنجليزي اسمه توماس هاريوت Thomas Hariot واحدًا منها لفحص سطح القمر. وفي نهاية السنة نفسها، قام جاليليو جاليلي أستاذ الرياضيات في جامعة بادوا بإيطاليا بتصميم تلسكوب متطور جدًّا، وأداره ناحية السماوات. وفي يديه أصبح التلسكوب مصدر الكثير من الاكتشافات الهامة. وقد نشر في أوائل ١٦١٠ كتابًا صغيرًا هو «مرسال النجوم» Sidereus Nuncius-starry Messenger.

اكتشف جاليليو أن سطح القمر كان كبير الشبه بسطح الأرض، به جبال وفوهات مخروطية، كان يمكنه تقدير ارتفاعاتها وعمقها، وأن هناك بقعًا على سطح الشمس تظهر وتختفي مع الزمن. وقد بين كل من هذين الاكتشافين أنه ليس كل الأجسام السماوية تامة «على عكس الفلسفة الأرسطية». كما أنه اكتشف أن هناك مراكز للدوران في العالم غير الأرض — فكان لكوكب المشتري أقمار، كما أن الشمس تدور حول محورها الخاص. وكان قادرًا على رؤية كوكب الزهرة وهو يمر بأطوار مثل القمر، أي قد يكون مضاء كله مثل القمر وهو بدر، أو مضاء جزئيًّا مثل القمر وهو هلال. ولا يمكن تفسير ذلك إلا إذا كان كوكب الزهرة يدور في دائرة حول الشمس.

كان جاليليو قادرًا على رؤية أن هناك الكثير جدًّا من النجوم في السماء أكثر مما كان يعتقد سابقًا، نجوم أبعد من أن ترى بالعين المجردة. ومع هذا فإن تلسكوبه كان يجعل الأشياء تبدو أقرب ثلاثين مرة عن رؤيتها بالعين المجردة، لكنها كانت تبدو مجرد نقاط من الضوء، مما يدل على أنها على الأقل كانت بالفعل بعيدة عن المسافة التي زعم كوبرنيكوس وجودها. وفي الحقيقة كما أشرنا، فإن ملاحظة النجوم بالتلسكوب تجعل قطرها الظاهري أقل من القطر الظاهري عندما ترى بالعين المجردة؛ نتيجة للفتحة الأكبر في التلسكوب. كان ذلك كله بمثابة تفنيد تجريبي لبعض الاعتراضات التي أثيرت في مواجهة نظرية مركز الشمس.

كان جاليليو قد بدأ قبل ذلك في تطوير مبادئ جديدة في الفيزياء معاكسة لتلك التي قال بها أرسطو، والتي استطاع بواسطتها مواجهة الاعتراض العلمي على منظومة كوبرنيكوس (راجع الفصل ٣). كان جاليليو شخصًا مفعمًا بالحيوية، وخبيرًا محنكًا ومجادلًا عنيفًا، ومشاركًا في المناظرات العلمية في أيامه. وكان في الحقيقة، مدمرًا في حججه سواء المكتوبة أو المنطوقة حتى إن ذلك قد أكسبه عددًا من الأعداء، وكذلك عددًا من الأصدقاء.

وبحلول ١٦١٦ كان الانقسام الديني الذي نشأ عن الإصلاح والإصلاح المضاد قد أصبح من الكبر بحيث تدنت هوامش التسامح في أي حيود عن العقائد الراسخة بشدة. وقد حُذر جاليليو في تلك السنة من الدفاع جهارًا عن منظومة كوبرنيكوس. وفي ١٦٢٣ أصبح الكاردينال باربريني Barberini المدافع المتميز عن الفنون والعلوم، بابا. وظنًا من جاليليو أن المناخ أصبح أكثر مواءمة، فقد شعر أنه يمكنه الشروع في دفاع أكثر شدة عن منظومة كوبرنيكوس. وفي النهاية وضع كتاب «محاورات تتعلق بالمنظومتين الرئيسيتين في العالم» Concerning the two chief world systems Dialogues، الذي كان مخصصًا للعامة المتعلمين من غير اللاهوتيين. وكان أسلوب الكتاب هو محاورات سقراط، وبه ثلاث شخصيات: مدافع عن منظومة بطليموس، ومدافع عن منظومة كوبرنيكوس ووسيط ذكي. وفي نهاية الكتاب أذعن المدافع عن كوبرنيكوس لصحة منظومة بطليموس، على الرغم من أنه كان من الواضح جدًّا للقارئ أن منظومة كوبرنيكوس قد تبين أنها هي الصحيحة. وبالإضافة إلى ذلك، كان المدافع عن بطليموس مصورًا كإنسان ساذج إلى حد ما.

تمكن جاليليو من الحصول على موافقة التفتيش (الرقابة) الكنسي على مخطوطته، وطُبع الكتاب سنة ١٦٣٢. ولسوء الحظ كان له أعداء كثيرون في مناصب رفيعة،

وسرعان ما تمكنوا من الإشارة إلى النية الحقيقية للكتاب وتضميناته. وقد أكدوا بحسم أن جاليليو كان يرمي إلى ازدراء الشخصيات الكنسية الرفيعة. وبعد بضعة أشهر حُرِّم الكتاب وصدر الأمر بتدمير النسخ الباقية منه. واستُدعي جاليليو للمحاكمة أمام محاكم التفتيش، وتحت تهديد الإعدام أجبر على إنكار عقيدة كوبرنيكوس وشجب الدفاع عنها. وربما نظرًا لتقدمه في السن، واعتلال صحته، وخضوعه لإرادة محاكم التفتيش، فإن عقوبته جاءت خفيفة نسبيًّا: اعتقال رهن المنزل والإحالة إلى التقاعد. وبرعاية ابنته غير الشرعية توفي بعد تسع سنوات في ١٦٤٢، قبل وقت قصير من عيد الميلاد الثامن والسبعين. لم يقم بالدفاع عن منظومة كوبرنيكوس بعد ذلك بهمة، لكنه كرس وقته لكتابة كتاب آخر «محادثات حول علمين» Discources on two Sciences الذي كتب فيه تفاصيل نتائج بحوثه في الميكانيكا والضوء. وقد نشر هذا الكتاب في هولندا، حيث كان الجو الفكري أكثر ملاءمة من إيطاليا.

نظرية مركزية الشمس

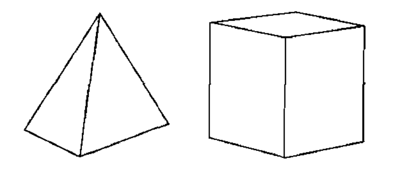
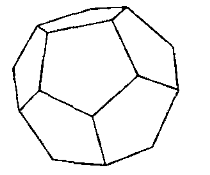
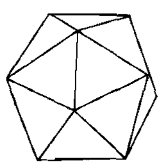
استخدم كل من تايكو براهي وجاليليو جاليلي منهجًا حديثًا نسبيًّا في معالجة المسائل العلمية. كان براهي يصر على أهمية جمع البيانات المنظمة والمستفيضة والدقيقة. أما جاليليو فلم يكن مهتمًّا بإجراء الملاحظات، لكنه كان يعترف بضرورة التداخل لتعديل الظروف التجريبية من أجل استبعاد العوامل الغريبة. وكان الرجلان عقلانيين جدًّا ومنطقيين في منهج أعمالهما. ومن ناحية أخرى، فكان كوبرنيكوس معنيًّا بالتضمينات الفلسفية لأعماله، وكذلك كبلر بل كان أكثر منه (وسنتحدث عنه فيما بعد). وكان كبلر على دراية جيدة بأن الفيثاغورسيين القدماء قد راكموا كمًّا كبيرًا حول العلاقات العددية البسيطة بين الظواهر. وكان الفيثاغورسيون هم الذين تعرفوا على أن النغمات الموسيقية تصبح أكثر بهجة إذا كانت المسافات بين مكوناتها متناغمة — أي مضاعفات بسيطة لبعضها. اكتشف الفيثاغورسيون كذلك أن نغمة الصوت الصادر عن وتر مشدود لها علاقة بطول الوتر، بحيث يمكن الحصول على النغمات الأعلى بتغيير طول الوتر بكسور بسيطة. وعندما استداروا ناحية السماوات، أكدوا بحسم أن كل كرة كوكبية، وكذلك كرة نجم، تبعث بصوتها الموسيقى المميزة الخاصة بها. ولم يلاحظ معظم البشر أبدًا مثل هذه الأصوات، فقط لأنهم يسمعونها باستمرار منذ الميلاد. وكان من المقترح أن المسافات بين الكرات كانت هي الأخرى تتناسب مع المسافات الموسيقية، وذلك وفقًا لبعض الأساطير حول الفيثاغورسيين.



جوهانس كبلر
(مكتبة نيلز بوهر AIP).

ولد جوهانس كلبر بعد نشر عمل كوبرنيكوس العظيم بثمان وعشرين سنة. وكان يحب الانغماس في تخمينات الفيثاغورسيين حول طبيعة السماوات. وقد تأثرت شخصيته بلا شك بطفولته غير السعيدة، صحة معتلة نسبيًّا، وافتقار للأصدقاء في شبابه. وقد أظهر عبقرية رياضية وهو مراهق، ونجح وهو شاب في الحصول على وظيفة معلم للرياضيات. وسرعان ما اعتُرف بمقدرته الرياضية، ونتيجة لذلك تم التغاضي عن عيوبه كمعلم وعن مشاكل شخصيته. وحقيقة أنه كان معلمًا سيئًا لم يحصل على عدد كبير من الطلبة قد ساعدته في توفير وقت أكبر لدراساته الفلكية وتخميناته.

كان كبلر مقتنعًا أساسًا بصحة نظرية مركزية الشمس، وكان ينظر إلى الأرض كواحد من الكواكب الستة التي تدور حول الشمس. ونظرًا لولعه الشديد بالأرقام، فإنه كان يتعجب لكون الكواكب ستة وليس عددًا آخر، ولماذا هي على هذه المسافات من بعضها، ولماذا تتحرك بسرعاتها بالتحديد. وفي بحثه عن أي ارتباط بالهندسة، استرجع ما كان الإغريق القدماء قد أثبتوه من أن هناك فقط خمسة جوامد «تامة» معروفة باسم الجوامد الفيثاغورسية أو الأفلاطونية، هذا عدا الكرة.

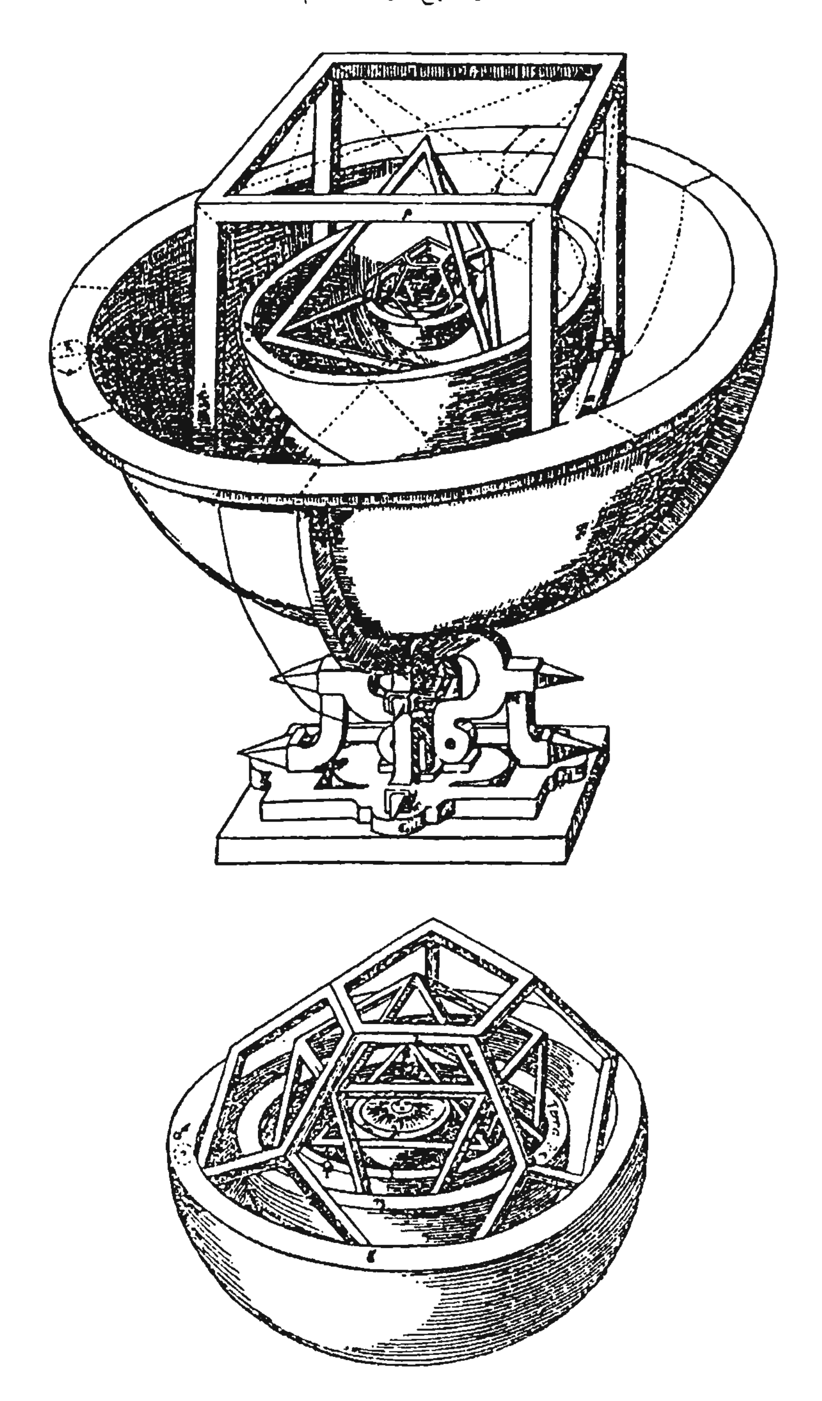
المجسمات الأفلاطونية

شكل ٢-٨: المجسمات الأفلاطونية. من اليسار إلى اليمين: شكل رباعي الأسطح، مكعب، شكل ثماني الأسطح، شكل ذو اثنا عشر سطحًا، شكل ذو عشرين سطحًا.

- كانت كرة زحل هي أكبر الكرات، موجود بداخلها مكعب يمس سطحها الداخلي بأركانه. وداخل المكعب هناك كرة هي كرة المشتري، وهي من الكبر بحيث تمس المكعب في منتصف أسطحه الداخلية. وبداخل كرة المشتري هناك شكل رباعي الأسطح Tetrahedron بداخله كرة المريخ. وبداخل كرة المريخ هناك شكل ذو اثني عشر سطحًا dodecahedron، ثم تأتي كرة كوكب الأرض ثم الشكل ذو العشرين سطحًا Icosahedron، ثم كرة الزهرة، فالشكل ثماني الأسطح، وأخيرًا أصغر الكرات، كرة عطارد. وبهذا الترتيب في المواقع، فإن نسبة أقطار الكرات تقريبًا قريبة من نسبة المسافات المتوسطة للكواكب من الشمس. وتحتفظ الأرض بشيء من التفرد في هذا المخطط: إذ تستقر كرة الأرض بين جامدين لهما أكبر عدد من الأسطح: وهما الجسمين ذو الاثنا عشر والعشرون سطحًا.

وبالطبع كان كبلر يعرف أن كرات الكواكب لم تكن منتظمة المركز حول الشمس، وقد وجد كوبرنيكوس أنه من الضروري إدخال مراكز منحرفة في حساباته. لذا جعل كبلر الكرات داخل أغلفة كروية سميكة بما يكفي لتستوعب تسكعات الكواكب وحيودها عن الحركة الدائرية التامة حول الشمس. لم تتفق النتائج بالضبط مع البيانات، لكنها اقتربت منها بما يكفي في رأي كبلر ليرغب في متابعة البحث. وقد نشر هذا المخطط في كتاب عنوانه «سر الكون» Mysterium Cosmogrephicum-The Cosmic Mystery، الذي أصبح معروفًا جيدًا ورسخ سمعته كرياضي قادر ومبدع وفلكي. وحيث إننا نعرف الآن أن هناك تسعة كواكب على الأقل،* فإن مخطط كبلر ليس له قيمة، على الرغم من أنه ما زالت الأسئلة مطروحة حول لماذا تقع

*أصبحت الكواكب ثمانية بعد استبعاد بلوتو في آخر مؤتمر فلكي. (المترجمان)



شكل ٢-٩: تنظيم كبلر للكرات والمجسمات الأفلاطونية لتفسير ترتيب الكواكب والمسافات بينها، ويوضح الرسم السفلي بمزيد من التفصيل كرات المريخ والأرض والزهرة وعطارد. لاحظ وجود الشمس عند المركز. (من الأشكال الواردة في كتاب «سر الكون» لكبلر.)

الكواكب على هذه المسافات من بعضها، وهل هناك أي قاعدة تحدد عدد الكواكب. وهناك مخطط آخر يجعل المرء يظن أنه صالح لوصف قانون بودي Bode أو قاعدة تيتيوس-بودي Titius-Bode. يقع هذا النقاش خارج مجال هذا الكتاب، لكن تقريرًا عن تاريخه وخصائصه التي تحدد ما إذا كانت مثل هذه القاعدة مفيدة ورد على صفحات ١٥٦–١٦٠ من كتاب جيرالد هولتون وستيفين بروش Gerald Holton and Stephen Brush المشار إليه في المراجع.

لم يكن كبلر قانعًا باقتراح مخططات خفية لا تُقدَّم إلا لعدد قليل من الناس فقط بالنسبة لترتيب الكواكب في السماوات، وسيكون راضيًا إذا عملت هذه المخططات بطريقة تقريبية. كان يعتقد أن أي نظرية لا بد أن تتفق كميًّا مع البيانات المتاحة. وكان يدرك، مثل كل الفلكيين في أوربا، وجود الكم الهائل من البيانات الدقيقة التي حصل عليها تايكو براهي. ومن جهة أخرى كان براهي مدركًا لمقدرة كبلر الرياضية. وفي ١٦٠٠ أصبح كبلر مساعدًا لبراهي، الذي انتقل إلى ضواحي براغ وأصبح رياضي البلاط لرودلف الثاني، إمبراطور الإمبراطورية الرمانية المقدسة (الاسم الفخيم الذي كانت تعرف به إمبراطورية النمسا-المجر في ذلك الوقت). طرد براهي من مرصده لأن سكان الجزيرة التي بُني عليها المرصد اشتكوا إلى ملك الدانمرك (ابن راعيه) أنه كان يتحكم فيهم باستبداد. لم تكن علاقة كبلر وبراهي صافية دائمًا، إلا أن كبلر وجد في بيانات براهي عامل جذب قوي. توفي براهي بعد ثمانية عشر شهرًا في ١٦٠١ (نتيجة للتخمة والإفراط في الأكل)، وتولى كبلر مباشرة الوصاية على كل البيانات. وفي ١٦٠٢ عُين كبلر خلفًا لبراهي رياضيًّا للبلاط لدى رودلف الثاني.

كان براهي يتعجل كبلر ليحاول تنقيح نظرية براهي التواقعية لتتواءم مع البيانات، إلا أن ذلك لم ينجح. عاد عندئذ إلى نظرية مركزية الشمس، لكنه لم يشارك كوبرنيكوس اعتراضه على الإيكوانت، لذلك ضمنه في الحسابات. كما أجرى بعض التحسينات على بعض افتراضات كوبرنيكوس التفصيلية، ليجعلها أكثر اتساقًا مع نظريةٍ حقيقيةٍ لمركزية الشمس. وقد ركز بالتحديد على حسابات مدار المريخ؛ لأن ذلك بدا أنه الأصعب في توافقه مع البيانات. وكان أفضل اتفاق حصل عليه في المتوسط هو ١٠ دقائق على القوس. إلا أن كبلر كان يشعر أن بيانات براهي كانت جيدة حتى إن أي نظرية مقنعة لا بد أن تتفق معها في غضون دقيقتين. وقد شعر بأن مفتاح مشكلة الكواكب كلها يكمن في الدقائق الثماني التي لا تتفق معها. وبالتدريج وفي معاناة شديدة، وعلى مدى عقدين تخللهما العديد من الأمور المعطلة التي تضمنت

تغيير الوظيفة، ووفاة زوجته الأولى، وخوض معركة مع المحكمة دفاعًا عن والدته ضد اتهامات بالسحر؛ تمكن من التوصل إلى نظرية جديدة.

وبعد قضاء عدد من السنوات في دراسة بيانات كوكب المريخ، يئس كبلر من إيجاد التوافق في جمع انحراف المركز والناقل وفلك التدوير والإيكوانت الذي يجعل من الممكن وصف المدار بمصطلحات الحركة الدائرية. لذلك قرر في النهاية التخلي عن الشكل الدائري، قائلًا إذا لم يرغب الرب أن يجعل المدار دائريًّا، إذن مثل هذا المدار ليس ملزمًا. وتحقق كبلر عندئذ من أن مهمته هي تحديد الشكل الحقيقي للمدار. وبعد بضع سنوات، وفي ١٦٠٩ أعلن كبلر قانونيه الأول والثاني بوصفهما حلًّا جزئيًّا للمشكلة. ومن المثير أن كبلر قد اكتشف قانونه الثاني أثناء تعامله مع سرعة الكوكب في رحلته حول المدار، قبل أن يكتشف شكل المدار الدقيق، كما هو مقدم في قانونه الأول. ومؤخرًا في ١٦١٩ أعلن حل المشكلة، قانونه الثالث لحركة الكواكب، الذي يربط بين مدار الكوكب وسرعته.

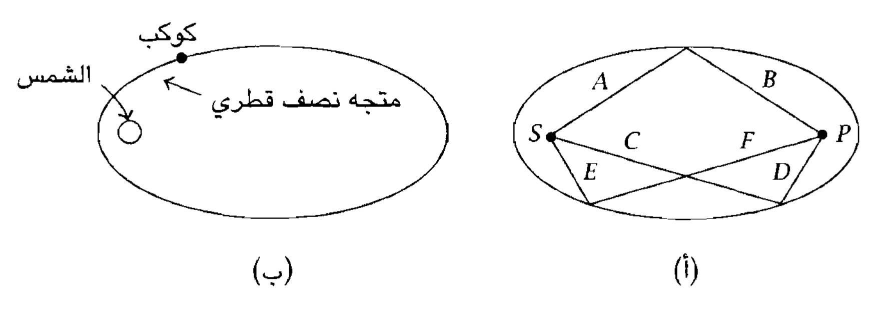
قوانين كبلر لحركة الكواكب بلغة اليوم، هي:

١- مدار كل كوكب حول الشمس قطع ناقص (بيضاوي) مع وجود الشمس في إحدى «بؤرتي» القطع الناقص

بمقارنه القطع الناقص بالدائرة، نجد أن الدائرة تحيط بنقطة خاصة تسمى المركز، وأن المسافة من المركز إلى أي نقطة على الدائرة هي نفسها دائمًا، أي ثابتة. بينما يحيط القطع الناقص بنقطتين خاصتين يطلق عليهما «بؤرتين»، وأن مجموع المسافتين من كل بؤرة إلى أي نقطة على القطع الناقص دائمًا ثابت. وقد صورنا هذا في شكل ٢-١٠(أ)، حيث مجموع أطوال الخطوط A وB أو C وD أو E وF هو نفسه دائمًا.

٢- يغطي الخط الواصل بين الشمس والكوكب (متجه نصف القطر) مساحات متساوية في فترات زمنية متساوية أثناء رحلة الكوكب حول المدار

في شكل ٢-١٠(ب) يستغرق الكوكب الفترة الزمنية نفسها ليرحل على طول أقواس القطع الناقص محددًا المساحتين المظلمتين اللتين لهما المساحة نفسها. لذا عندما يكون الكوكب قريبًا من الشمس تزداد سرعته، وعندما يكون بعيدًا عن الشمس تنخفض سرعته.



شكل ٢-١٠: مدارات الكواكب — القطع الناقص. (أ) تكون قطع ناقص: P،S هما البؤرتان. مجموع المسافات إلى أي نقطة على القطع الناقص من البؤرتين ($A + B$، $C + D$، و$E + F$) هو نفسه دائمًا. (ب) القانون الأول والقانون الثاني لكبلر. يستغرق الكوكب الفترة الزمنية نفسها ليقطع الأقواس على القطع الناقص التي تحدد المساحتين المظللتين إذا كانت المساحتان المظللتان متساويتين.

٣- يتناسب مربع الفترة الزمنية للدورة (الزمن اللازم لدورة واحدة كاملة حول المدار) لكوكب ما حول الشمس مع مكعب متوسط بعده عن الشمس

ورياضيًّا يعني ذلك أن نسبة T^2 إلى D^3، حيث T تمثل الفترة الزمنية وD متوسط المسافة، هي نفسها لجميع الكواكب وقد صورنا القانون الثالث في جدول ٢-١ الذي يورد الفترة الزمنية T (بالسنوات) للكواكب، ومتوسط مسافاتها D (بالوحدات الفلكية، والوحدة الفلكية تساوي ٩٣ مليون ميل)، ومربع الفترة الزمنية T^2، ومكعب متوسط المسافة D^3 بهذه الوحدات، والنسبة تساوي الواحد الصحيح — أي $T^2 = D^3$.

وبهذه القوانين الثلاثة استكمل كبلر البرنامج الذي بدأه كوبرنيكوس. جعل كوبرنيكوس الشمس في مركز منظومة الكواكب، واستبعد كبلر فكرة الحركة الدائرية التي كانت متطلبًا للأجسام السماوية، وباستخدام مدارات على شكل قطع ناقص، تم الاحتفاظ ببساطة وجمال نظرية مركزية الشمس، في توافق رائع مع البيانات، ودون الحاجة إلى تصميمات مثل المركز المنحرف وفلك التدوير والناقل أو الإيكوانت. وحقيقة أن بؤرة القطع الناقص ليست في المركز تزودنا بانحراف المركز. ويؤدي قانون كبلر الثاني الوظيفة نفسها مثل الإيكوانت في تفسيره للسرعة المتغيرة للكوكب أثناء رحلته حول المدار.

ذهب كبلر أبعد من ذلك وأشار إلى أن الشمس هي المحرك الأصلي Anima matrix أو العامل المسبب. وقد وضع سبب الحركة في مركز الفعل وليس على أطرافه كما فعل أرسطو. وكان لدى كبلر فكرة بدائية حول قوى الجاذبية التي تمارسها

جدول ٢-١: البيانات التي تصور قانون كبلر الثالث لحركة الكواكب في المجموعة الشمسية.

الكوكب	T	D	T^2	D^3
عطارد	٠,٢٤	٠,٣٩	٠,٠٥٨	٠,٠٥٩
الزهرة	٠,٦٢	٠,٧٢	٠,٣٨	٠,٣٧
الأرض	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠
المريخ	١,٨٨	١,٥٣	٣,٥٣	٣,٥٨
المشتري	١١,٩	٥,٢١	١٤٢	١٤١
زحل	٢٩,٥	٩,٥٥	٨٧٠	٨٧١

الشمس، لكنه فشل في ربط الجاذبية بمدارات الكواكب. وأكد بشكل حاسم بدلًا من ذلك أن الشمس تمارس تأثيرها من خلال تجميع الأشعة المنبعثة بواسطة الشمس والمغناطيسية الطبيعية للكوكب. وقد كان متأثرًا في اعتقاده ببعض العروض الماهرة للتأثيرات المغناطيسية بواسطة ويليم جلبرت William Gilbert الطبيب والفيزيائي الإنجليزي.

كانت ترجمة العنوان الكامل للكتاب الذي نشر في ١٦٠٩ حول القانونين الأول والثاني هو: «علم الفلك الجديد القائم على السببية، أو فيزياء السماء المشتقة من دراسات حركات كوكب المريخ، التي تقوم على أساس ملاحظات النبيل تايكو براهي» A New Astronomy Based on Causation or a Physics of the Sky Derived From Investigations of the Motions of the Star Mars Founded on Observations of the Noble Tycho Brahe (يشار إليه عادة باسم علم الفلك الجديد New Astronomy.) كان كبلر قد أكمل بالفعل الخطوط العريضة للكتاب في ١٦٠٥، إلا أن طباعته استغرقت أربع سنوات بسبب النزاع مع ورثة تايكو براهي حول امتلاك البيانات.

كان القانون الثالث لكبلر يدعى القانون الهارموني Harmonic law وهو معروض في كتاب يسمى إيقاع العالم Harmony of the World نشر عندما كان كبلر يشغل منصبًا أقل كرياضي محلي في مدينة لينز (Linz) بالنمسا، (كان راعيه السابق رودلف الثاني قد أجبر على التنازل عن العرش، وبذلك فقد كبلر وظيفته.) رجع كبلر في هذا الكتاب إلى صوفية الفيثاغورسيين التي اعتنقها في باكورة أيامه، ليبحث عن علاقات التناغم بين أبعاد الكواكب عن الشمس. وبدلًا من اكتشاف علاقة بين «السلم الموسيقي» للكرات السماوية وحجمها، اكتشف العلاقة بين سرعة الكواكب

(أي الفترة الزمنية للدورة)، وربط بشكل ما بينها وبين السلم الموسيقي والتناغم، وحجم المدار. وقد دعم هذا الربط مع التناغم ببعض الحسابات التي كانت مفاجأة في دقتها.

كان كبلر هو الشخص المناسب في الوقت المناسب ليكتشف قوانين حركة الكواكب. فأولًا وربما الأكثر مغزى أن كبلر كان صوفيًّا فيثاغورسيًّا. كما كان رياضيًّا ذا مقدرة فائقة ويعتقد أن الكون يمتلئ بالتناغمات الرياضية. ولشغفه بالأرقام والأشكال، كان الأمر نسبيًّا سهلًا بالنسبة له ليتبنى مدارات القطع الناقص — بمجرد أن تحقق نهائيًّا أن التصميم الدائري لا بد أن يكون خطأ. وأخيرًا كان كبلر مساعد براهي، ولذا كانت قياسات تايكو براهي متاحة له، وكان يعرف كم كانت دقيقة. ولم يكن في مقدور أي شخص آخر، أو موضع اهتمام من أحد، أن يجري الحسابات الرياضية التي تطلبها اكتشاف قوانين حركة الكواكب، ولا كان ذلك ممكنًا لأي أحد ممن يعتبرون التفاوت (أو الخطأ) في زاوية قدرها ثمان دقائق أمرًا له أهمية.

قام كبلر بإرسال نسخ من أعماله إلى عدد من أفضل الفلكيين المعروفين في أيامه وتراسل معهم بغزارة. وعمومًا، على الرغم من كونه محترمًا، فإن مغزى وتضمينات نتائجه ظلت غير معترف بها مدة طويلة فيما عدا بعض الفلكيين والفلاسفة الإنجليز، فقد تعود معظم الفلكيين على التوافق المتدني نسبيًّا بين النظرية والبيانات، ولذا فقد تشربوا فكرة الحركة الدائرية، حتى إنهم لم يتأثروا كثيرًا بنتائج كبلر.

فجاليليو مثلًا قد أهمل تمامًا أعمال كبلر حتى على الرغم من أنهما كانا يتراسلان، وكان جاليليو أسرع من أخذ يبحث عن دليل على مشاهداته في التلسكوب في أعمال كبلر. وليس واضحًا ما إذا كانت صوفية كبلر الفيثاغورسية هي التي صدت جاليليو، أم أنه مقتنع بالحركة الدائرية كحركة طبيعية للأرض وللكواكب الأخرى حتى إنه ببساطة لم يتقبل أي تفسير آخر. والحقيقة مع ذلك، هي أن جاليليو لم يباشر عمله بالتلسكوب إلا بعد أن نشر كبلر كتابه «علم الفلك الجديد»، ولم ينشر كتابه «الحوار» Dialogues سنة ١٦٣٢ إلا بعد وفاة كبلر بعامين.

وفقط بعد أن قام كبلر بحساب مجموعة جديدة من الجداول الفلكية، أطلق عليها اسم جداول رودلف Rudolphine Tables ونشرها سنة ١٦٢٧، أصبح من الممكن استخدام أفكاره وبيانات تايكو براهي لحساب التقاويم التي كانت أكثر دقة بكثير من التي سبق حسابها. فمثلًا، كانت التناقضات في الجداول القائمة على نظرية كوبرنيكوس، قد اكتشفها تايكو براهي في غضون عشر سنوات من نشرها،

وقد ظلت الجداول الرودلفية تستخدم لقرن من الزمان تقريبًا. وأثناء هذا الوقت أخذت أعمال كبلر تلقى تدريجيًّا قبولًا أكثر. غير أن أعمال كبلر لم تحظ بالقبول التام حتى مرت سبعون سنة أخرى، أي عندما نشر إسحاق نيوتن قوانينه للحركة وقانون الجاذبية العالمية، التي فسرت كيف ظهرت قوانين كبلر للوجود.

منهج الثورات العلمية

يشار غالبًا إلى إحلال نظرية مركزية الشمس محل نظرية مركزية الأرض بأنها ثورة كوبرنيكية Copernican. وبوصفها «ثورة» فإن الثورة الكوبرنيكية هي النموذج الأصلي للثورة العلمية، التي تقارن بها الثورات العملية الأخرى. وفي الحقيقة لا يمكن مقارنة أي ثورة علمية أخرى بها بمدلول تأثيرها على أطوار الفكر، على الأقل في الحضارة الغربية. والثورة الوحيدة التي تقترب منها في هذا الصدد هي الثورة الداروينية، التي توافقت مع تطوير النظرية التطورية البيولوجية.

ويشار غالبًا إلى الثورة الكوبرنيكية على أنها تصور التناقض بين العلم والدين، مع أن زعماءها — كوبرنيكوس وجاليليو وكبلر — كانوا أتقياء ورعين. وعلى الجانب الآخر، وفي داخل المؤسسة الدينية، كان هناك الكثيرون الذين لم يكونوا يتبعون التفسير الحرفي للعقيدة الدينية، وفي البداية على الأقل كان أكثر الخوف بالنسبة للثوريين ليس اللوم أو الاستهجان بواسطة السلطات الدينية بل سخرية نظرائهم العلميين. فكيف لهم أن يتَحَدَّوا الكيان الراسخ للمعرفة العلمية والإيمان؟

فضلًا عن هذا، لم تحدث الثورة بين يوم وليلة، فقد مر حوالي ١٥٠ سنة بين بداية الدراسة الجادة لكوبرنيكوس وحتى نشر نيوتن دراسته عن الجاذبية. أما بذور الثورة فترجع إلى الوراء حوالي ألفي عام قبل كوبرنيكوس، إلى فيلولاوس Philolaus الفيثاغورسي. ومع تراكم النظريات الأقدم والحقائق الغريبة غير المفسرة، أصبح حمل إدخال التحسينات الضرورية ثقيلًا، وأخذت تنهار النظريات الأقدم. ورغم ذلك، كانت هذه النظريات الأقدم ناجحة بشكل عجيب. وفي الحقيقة، كان عدد قليل فقط من الأجسام السماوية من بين كل جيش السماوات (الكواكب) قد تسبب في صعوبات كبرى للنظرية المستقرة. وقد حدثت الثورة بسبب التحسينات الكمية في البيانات والاعتراف بالتناقضات (الفروق) الضئيلة وليس التناقضات الكبيرة، ليس فقط في البيانات وإنما كذلك في الطريقة التي عوملت بها هذه البيانات. كذلك فإن تطوير التكنولوجيات الجديدة والأجهزة الجديدة التي أعطت نوعيات وأنواعًا جديدة

من البيانات، لعب دورًا عظيمًا. وفي الوقت نفسه لم تكن المفاهيم الجيدة نفسها في البداية قادرة على استيعاب كل البيانات، وكان المدافعون عنها مطالبين أن يكونوا صامدين بشكل غير معقول في مواجهة النقد العنيف. وعلى الأرجح، كانت نظرية جديدة متوقعة ستتخطى العدد الكبير من الاعتراضات، وحتى عندئذ فإن بعض المدافعين عن النظرية القديمة لم يقتنعوا أبدًا في الواقع.

ليست كل الأفكار الثورية في العالم ناجحة، أو حتى تستحق أن تنجح. فإذا فشلت الحقائق القائمة في تفسير الحقائق المستقبلية التي ستتطور، أو إذا كانت غير قادرة على التعديل، أو التحسين، أو التطوير في مواجهة المزيد من الحقائق، فإن قيمتها تصبح ضئيلة. كانت نظرية مركزية الشمس ناجحة لأنها كانت قابلة للتكيف. كان كبلر وكوبرنيكوس وآخرون قادرين على تضمين أشياء مثل المراكز المنحرفة وأفلاك التدوير داخل المخطط، وأخيرًا، ضمنوا شكلًا مختلفًا للمدار، القطع الناقص، وذلك دون أن يدمروا الفكرة الأساسية، بحيث يمكن توسيعها لتتسع لتنويعات واسعة من الحقائق التجريبية.

الفصل الثالث

ميكانيكا نيوتن والسببية

الكون آلية تعمل بالقواعد



إسحاق نيوتن
(الصورة مهداة من مرصد ييركز Yerkes، جامعة شيكاغو).

كان تطوير فرع الفيزياء المعروف باسم الميكانيكا هو الذي فسر أخيرًا قوانين حركة الكواكب التي ناقشناها في الفصل الثاني. ويهتم علم الميكانيكا بوصف حركة الأجسام المادية وبأسبابها، وهو لا يفسر فقط حركة الأجسام السماوية بل أيضًا

الأجسام الأرضية، بما في ذلك الأجسام الساقطة والقذائف. وتدخل الميكانيكا بدرجة ما في كل الدراسات الفيزيائية، وتسمى أحيانًا العمود الفقري للفيزياء. وبعد إسحاق نيوتن، بدا أن قوانين الميكانيكا تستطيع تفسير كل الظواهر الأساسية في الفيزياء في الكون تقريبًا. ويعزى هذا النجاح على نطاق واسع إلى تطور عصر العقل، الزمن الذي أصبح فيه الكثير من الباحثين يعتقدون أن كل العلوم، بما في ذلك العلوم الاجتماعية والاقتصادية، يمكن تفسيرها بمدلول عدد قليل من المبادئ الأساسية الكامنة.

الفيزياء الأرسطية

كان الإغريق القدماء ضمن المساهمين المبكرين في علم الميكانيكا، وبالتحديد أرسطو. توارث الإغريق مختلف فصائل المعرفة والأفكار التي تتعلق بالظواهر الطبيعية من الحضارات السابقة، وعلى وجه الخصوص من ثقافات المصريين وبلاد ما بين النهرين. وعلى الرغم من تراكم كمية كبيرة من المعرفة (أكبر مما يمكن أن يصدقه معظم الناس حقيقة)، فإن القليل جدًّا فقط أُنجز لفهم هذه المعلومات. وعمومًا قدمت الديانات المختلفة التفاسير، ولكن ليس بواسطة تسلسل من الحجج المنطقية بدءًا من القليل من الافتراضات الأساسية. وهكذا، مثلًا، كان المصريون القدماء يقولون إن الشمس ترحل عبر السماء لأنها كانت تركب عربة إله الشمس. ولا يحتاج مثل هذا التفسير بوضوح إلى حجة منطقية لتدعم استنتاجه.

وكان الإغريق الأوائل هم الذين بدءوا محاولة إحلال الحجج المنطقية محل التفسيرات الدينية. لم تكن نظرياتهم دائمًا صوابًا، لكن أكثر مساهماتهم أهمية كان تطوير منهج تفسير الظواهر الفيزيائية. وقد عبر أفلاطون عن الغرض الأساسي من هذا المنهج بوضوح في روايته الكهف، التي ناقشناها في الفصل الثاني. وهدف العلم (أو الفلسفة الطبيعية كما كانت تسمى سابقًا) هو «تفسير» المشاهد — أي تفسير ما نشاهده بمدلول المبادئ الأساسية.

ربما كان أول شخص يُجري محاولة جادة لتطوير نظرية فيزيائية موحدة هو أرسطو (٣٢٢–٣٨٤ق.م)، تلميذ أفلاطون ومعلم الإسكندر الأكبر. وإلى حد علمنا حتى الآن، أن أرسطو كان أول فيلسوف يضع منظومة شاملة قائمة على مجموعة من الافتراضات البسيطة التي استطاع منها بالمنطق تفسير كل الظواهر الفيزيائية المعروفة. وقد أعطى الفصل الثاني مقدمة لهذه المنظومة فيما يتعلق بحركات الأجسام السماوية. رغب أرسطو في تفسير الطبيعة الأساسية والخواص لكل الأجسام المادية،

وقد تضمنت تلك الخواص وزنها، وصلابتها، وحركاتها. وفي الواقع، كانت أوصافه للعالم الفيزيائي تتسيدها المادة. وقد بدأ من بضعة افتراضات أساسية فقط، ثم تقدم نحو محاولة تفسير مشاهدات أكثر تعقيدًا بمدلول هذه الافتراضات البسيطة.

اعتقد أرسطو أن المادة تتكون من كميات مختلفة من أربع مواد أولية: الأرض، والماء، والهواء، والنار. وكان يعتقد أن الأجسام التي في السماوات تتكون من مادة سماوية تسمى الأثير، أما الأجسام الأرضية فإنها لا تحتوي على هذه المادة السماوية. وبذلك كانت معظم الأجسام الأثقل تعتبر مثل الأرض والماء، بينما الأجسام الأخف كانت تحوي كميات واضحة من النار والهواء. وكانت تفسر الخصائص المختلفة للمواد المعروفة بمدلول اتحاد كميات مختلفة من المواد الأولية الأربع. وفضلًا عن ذلك، ما يعد أكثر أهمية لتطويره لموضوع الميكانيكا هو أن أرسطو كان يعتقد أنه يمكن تفسير حركات الأجسام على أنها ترجع إلى الطبائع الأساسية للمواد الأولية.

عدد أرسطو أربعة أنواع من الحركة التي يمكن مشاهدتها في العالم الفيزيائي: (١) تبديل أو تغير alteration، (٢) حركة طبيعية محلية، (٣) حركة أفقية أو عنيفة، (٤) حركة سماوية. ولا يعتبر التبديل أو التغير حركة بالمرة بمدلول التعريفات الحديثة. وبالنسبة لأرسطو كانت الخصائص الأساسية للحركة هي حقيقة تغير المنظومة الفيزيائية موضع الفحص. وبذا كان يعتبر صدأ الحديد، وتحول لون الأوراق، أو خبو الألوان نوعًا من الحركة. وتعتبر هذه التغيرات الآن جزء من الكيمياء. ونحن نعتبر الآن أن الحركة تعني الإزاحة الفيزيائية لجسم ما، أما الصدأ وخبو الألوان فتتضمن إزاحة لكن على المستوى تحت الميكروسكوبي. ويقع فهم هذا النوع من «الحركات» خارج النطاق والهدف هنا، على الرغم من أن بعض سمات الحركات الجزيئية والذرية سنناقشها فيما بعد.

أما النوع الثاني من الحركة لأرسطو، الحركة الطبيعية المحلية، فهو في مركز أفكاره الأساسية فيما يتعلق بطبيعة الحركة. وبالنسبة له كانت الحركة الطبيعية هي إما إلى «أعلى» أو إلى «أسفل». (كان الإغريق يعتقدون أن الأرض كرة وأن كلمة إلى أسفل تعني في اتجاه مركز الأرض وإلى أعلى تعني مباشرة الابتعاد عن مركز الأرض.) كان أرسطو يعرف أن معظم الأجسام إذا تم تحريرها دون أي عائق على حركتها، فإنها ستسقط إلى أسفل، ولكن بعض الأشياء (مثل النار والدخان والغازات الساخنة) سترتفع إلى أعلى بدلًا من ذلك. اعتبر أرسطو أن هذه الحركات إلى أسفل وإلى أعلى طبيعية وناتجة عن غلبة طبائع الأجسام، لأن الأجسام لا تحتاج إلى شد



تمثال لأرسطو
(مكتب المراجع الفنية).

أو دفع. وبذا كان يقال إن الأرض (الصخور والرمل وأشباهها) ترغب في الحركة «طبيعيًّا» في اتجاه مركز الأرض، وهو المكان الطبيعي لاستقرار المواد الأرضية. وكان يعتقد أن الماء بالمثل يميل «طبيعيًّا» إلى الحركة في اتجاه مركز الأرض. وفي مركز الأرض فقط لن تتحرك المواد الأرضية طبيعيًّا.

والأجسام التي تتسيدها المواد الأولية، النار أو الهواء، سترتفع طبيعيًّا كما كان يعتقد أرسطو. وكان تفسير ذلك أيضًا هو طبيعة الهواء والنار: فالاستقرار الطبيعي لهذه المواد هو في السماوات. وبذلك فإن الهواء والنار عندما يتحرران فإنهما «طبيعيًّا» سيرتفعان. وقد رأى أرسطو أن كل الحركة «الطبيعية» ترجع إلى كفاح الأجسام لتصبح أكثر «اكتمالًا». وقد اعتقد أن الأرض والماء يصبحان أكثر مثالية واكتمالًا كلما تحركا إلى أسفل في اتجاه موقع استقرارهما الطبيعي، وأن النار والهواء يصبحان أكثر مثالية واكتمالًا كلما تحركا إلى أعلى في اتجاه موقع استقرارهما الطبيعي.

لم يتوقف أرسطو في تفسيره لماذا تسقط الأجسام أو ترتفع عندما تتحرر، وإنما ذهب أبعد من ذلك وحاول فهم كيفية سقوط الأنواع المختلفة من الأجسام بالنسبة إلى

بعضها البعض. وقد درس كيف تسقط الأجسام الثقيلة والأجسام الخفيفة، وكيف تسقط في الأوساط المختلفة، مثل الهواء والماء. وقد توصل إلى نتيجة أنه في الأوساط الكثيفة تسقط الأجسام ببطء أكثر، وأن الأجسام الثقيلة تسقط نسبيًّا أسرع من الأجسام الخفيفة، وعلى الأخص في الأوساط الكثيفة. وقد أيقن أنه في الأوساط الأقل كثافة (وقد نقول الأقل مقاومة) مثل الهواء، تسقط الأجسام الأثقل والأجسام الأخف بالسرعة نفسها تقريبًا. بل حتى إنه قد تنبأ على صواب بأن كل الأجسام ستسقط بالسرعة نفسها في الفراغ. ومع ذلك فقد تنبأ أيضًا بأن السرعة قد تكون لانهائية كبيرة. وقد تعني السرعات اللانهائية أن الجسم قد يتواجد في مكانين في آن واحد (لأنه لن يستغرق أي وقت بالمرة ليتحرك من مكان إلى آخر.) هكذا جادل أرسطو — وهو هراء! لذلك استنتج أن الفراغ التام لا بد أن يكون مستحيلًا «فالطبيعة تمقت الفراغ». وكما سنرى، أصبح هذا الاستنتاج الأخير فيما بعد بؤرة تناقضات، وتسبب في بعض الصعوبات في تقدم التفكير العلمي.

ومع أن استنتاجات أرسطو لم تكن كلها صحيحة فيما يتعلق بطبيعة الأجسام الساقطة، فمن المهم أن نفهم أن طرقه ساهمت بالقدر نفسه الذي ساهمت به هذه النتائج. اعتمد أرسطو بقوة على الملاحظات الدقيقة. ثم صاغ بعدها نظريات وفرضيات لتفسير الذي رآه. وأخذ ينقح ملاحظاته ونظرياته إلى أن شعر بأنه قد فهم ما الذي يجري، ولماذا.

كان النوع الثالث للحركة عند أرسطو هو الحركة الأفقية، التي قسمها إلى نوعين أساسين: (١) حركة الأجسام التي تدفع أو تشد باستمرار، و(٢) الأجسام التي يقذف بها أو تضرب، أو القذائف. وقد اعتبر أن الحركة الأفقية حركة غير طبيعية، أي أنها لا تنشأ بسبب طبيعة الجسم ولا يمكنها أن تحدث تلقائيًّا عندما يتحرر الجسم. والنوع الأول يتضمن مثلًا: عربة تجر، أو كتلة تشد أو تدفع، أو شخصًا يسير، وهو نوع لا يمثل أي صعوبة. ويظهر أن سبب الحركة يكمن في الشخص أو الحيوان الذي يشد أو يدفع أو يسير.

أما النوع الثاني من الحركات الأفقية، أي حركة القذائف، فقد كان أصعب بالنسبة لفهم أرسطو له، وكان يمثل واحدًا من المجالات في الظواهر الطبيعية التي يبدو أنه لم يكن متأكدًا من تفسيراته لها. لم تكن الصعوبة في رأيه سببها أن تبدأ القذيفة حركتها (كان ذلك واضحًا مثل مصدر حركة الشد أو الدفع)، ولكن ما الذي يجعل القذيفة تستمر في الحركة بعد أن يلقى بها أو تضرب. وقد طرح

السؤال البسيط «لماذا تستمر القذيفة في الحركة؟» وعلى الرغم من أن السؤال يبدو واضحًا وهامًّا، فكما سنرى، فإن هناك سؤالًا أفضل وأكثر فائدة لنطرحه حول حركة القذائف.

توصل أرسطو أخيرًا إلى تفسير لحركة القذائف، مع أن المرء يشعر أن أرسطو لم يكن مقتنعًا هو نفسه تمامًا بالحل الذي جاء به. اقترح أرسطو أن الهواء الذي دفع به جانبًا بواسطة مقدمة القذيفة يعود إلى الوراء ويندفع ليملأ الفراغ المؤقت (المكان الخالي) الذي يتكون كلما تحركت القذيفة إلى الأمام، وأن هذا الهواء المندفع هو الذي يدفع القذيفة إلى الأمام. وتبدأ هذه العملية بفعل قذف أو ضرب الجسم، وتستمر بنفسها بمجرد أن تبدأ. وقد أصبحت كل هذه العملية تعرف باسم «التدعيم» antiperistasis وكانت هي الجزء الأول من فيزياء أرسطو الذي واجه تحديًا جادًّا، وكان أرسطو نفسه يتعجب مما إذا كان ذلك بالفعل هو التحليل الصحيح، ولذلك فإنه قد اقترح كذلك أن حركة القذيفة تستمر ربما لأن عمودًا من الهواء قد أخذ يتحرك أمام القذيفة وعلى طول الجسم أثناء عملية القذف. واقترح أن هذا العمود المتحرك من الهواء ربما يسحب معه القذيفة. لم يكن هذا الغموض أو الالتباس عاديًّا بالنسبة لأرسطو، وهو يؤكد شكوكه الخاصة حول فهمه لحركة القذيفة.

كان النوع الأخير من أنواع الحركة لأرسطو هو الحركة السماوية أو حركة الكواكب. كان يعتقد أن الأجسام في السماوات مختلفة تمامًا عن الأجسام الأرضية. فبالنسبة له كانت الأجسام السماوية تامة مثالية وبدون كتلة ومصنوعة من الأثير السماوي. وقد تقبل أرسطو الفكرة الفيثاغورسية بأن الشكل الكامل الحقيقي هو الدائرة (أو الكرة في أبعاد ثلاثة)، ولذلك فقد دفع بأن هذه الأجسام الكاملة المثالية كانت كلها كرات تتحرك في مدارات دائرية كاملة (راجع فصل ٢). ولنتذكر أن أرسطو كان يعتبر أن الأجسام السماوية والحركات السماوية تخضع لقوانين تختلف عن تلك التي تخضع لها الأجسام الأرضية غير المثالية وغير التامة، وقد اعتبر الأرض متميزة بعدم الكمال على عكس السماوات، وأن الأرض كانت مركز عدم الاكتمال لأن الأشياء لم تكن في حالتها المستقرة الطبيعية. فالموارد الأرضية من الأرض والماء لا بد أن تتحرك إلى الأسفل لتصبح في مكان استقرارها الطبيعي، بينما الهواء والنار لا بد أن يتحركا إلى الأعلى ليصبحا في مكان استقرارهما الطبيعي. وكانت الأرض غير تامة لأن هذه الأشياء كانت مخلوطة ببعضها وليست في مواقعها الطبيعية.

ولأن فيزياء أرسطو قد تم استبعادها على الأغلب، فإننا نميل إلى أن نبخس أهمية مساهمات أرسطو في العلم حقها. كانت أعماله تمثل أول وصف «ناجح» للعالم الفيزيائي بمدلول الحجج المنطقية القائمة على عدد قليل من الافتراضات البسيطة المعقولة. وتشهد الألفا عام التي كان يعتبر فيها نظام أرسطو هو الوصف الصحيح للعالم في العالم الغربي المتحضر، تشهد بأن هذا النظام كان منطقيًّا ومتسقًا مع نفسه. وقد تقبلت الكنيسة الكاثوليكية فيزياء أرسطو كعقيدة (ما زالت فيزياء أرسطو تدرس في بعض المدارس الكاثوليكية وبعض الجامعات الإسلامية في القرن العشرين.)

لكن الأكثر أهمية من النظام الذي صممه، هو الطريقة التي أدخلها لوصف العالم الفيزيائي. فنحن ما زلنا نتقبل (أو نأمل) أن الوصف الصحيح يمكن أن يبدأ من بضعة افتراضات بسيطة، ثم يتواصل من خلال الحجج المنطقية ليصف حتى المواقف المعقدة. كانت الأسئلة التي تناولها هامة: من أي شيء صُنعت الأجسام؟ لماذا تسقط الأجسام؟ لماذا تتحرك الشمس والقمر والنجوم؟ لماذا تظل القذائف تتحرك. لقد كان أرسطو أكثر من أي شخص آخر صياغة للأسئلة الأساسية في الفيزياء.

ومع انحدار القوة العسكرية الإغريقية وصعود روما، أخذ التقدم العلمي في العالم القديم يتباطأ حتى أصبح يحبو. وعلى الرغم من أن الإمبراطورية الرومانية قد قدمت الكثير للحضارة الغربية في مجالات معينة (بما في ذلك القانون والهندسة والعمارة)، فإنها ارتدت بشكل كبير إلى الممارسات المبكرة في تفسير الظواهر الفيزيائية بمدلول الدين. وأي تقدم علمي كان هناك (وكان منه القليل مقارنة بالمساهمات العظيمة للفلاسفة الإغريق) فقد جاء من شرق المتوسط. كانت الإسكندرية بمصر موقع المكتبة المشهورة ومركزًا للمفكرين والعلماء على مدى مئات السنين. وكانت الإسكندرية هي المكان الذي صنف فيه بطليموس (بعد حوالي خمسمائة سنة من أرسطو) مشاهداته للنجوم الطوافة، وصمم منظومته — مركزية الأرض، التي ناقشناها في فصل ٢.

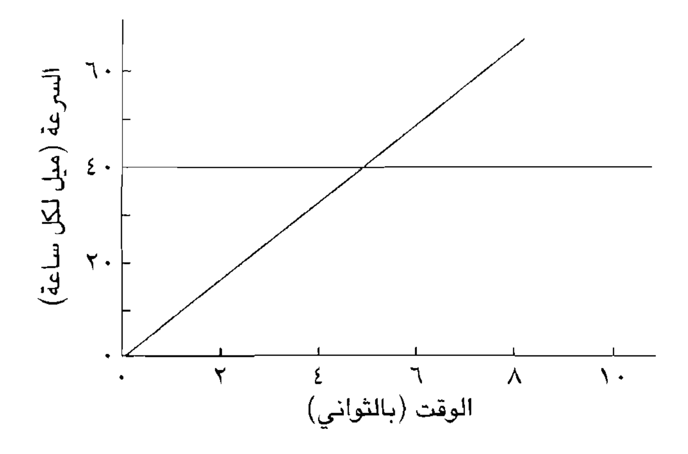
وبعد ثلاثمائة وخمسين سنة من بطليموس، وفي سنة ٥٠٠م وفي الإسكندرية كذلك، عبّر جون فيليبونوس John Philiponus — جون النحوي Grammarian — عن بعض أوائل الانتقادات المسجلة لفيزياء أرسطو. انتقد جون فيليبونوس تفسير أرسطو لحركة القذيفة (فكرة «التدعيم»)، دافعًا بأن القذيفة تكتسب نوعًا من القوة الدافعة عند دفعها لتتحرك. ويعد هذا أقرب كثيرًا إلى فهمنا الحديث، كما سنرى، أن القذيفة تحصل على كمية حركة تستخدمها في حركتها. كما تشكك فيليبونوس أيضًا في استنتاج أرسطو أن الأجسام ذات الأوزان المختلفة تسقط بالسرعة نفسها في الفراغ

(والذي رفضه أرسطو على أنه مستحيل). وقد استعرض فيليبونوس حالات كانت فيها أجسام من أوزان مختلفة جدًّا تسقط أساسًا بالسرعة نفسها في الهواء. من الملاحظ أن هذه الانتقادات الجادة الأولى قد جاءت بعد أكثر من ثمانمائة سنة من وفاة أرسطو.

ومع سقوط الإمبراطورية الرومانية ودخول أوربا في عصور الظلام، وبالتحديد مع تدمير مكتبة الإسكندرية والمركز الفكري فيها، انتهى كل التقدم العلمي في الأساس. وقد قام المفكرون والعلماء العرب ببعض الأبحاث، وبالأخص الفلكية، وهم الذين حفظوا الكثير من الفلسفة الإغريقية. وأخيرًا، وبعد سبعمائة سنة أخرى، بدأ عصر النهضة، وأعاد المفكرون والعلماء الأوربيون اكتشاف المساهمات الإغريقية المبكرة في الفلسفة والفن. وكان أحد الدوافع الرئيسية لعصر النهضة هو إعادة الالتزام بشكل الفكر الإغريقي. وكان لا بد من الحصول على الكثير من الأعمال الإغريقية المبكرة من النصوص العربية، وأساسًا من إسبانيا وصقلية، حيث كانت المسيحية والإسلام متداخلين. وفي القرن الثالث عشر قام القديس توماس الأكويني St. Thomas Aquinas (١٢٢٥–١٢٧٤) بالتقريب بين فلسفة أرسطو والعقيدة الكاثوليكية. وفي بداية القرن الرابع عشر، أصبحت المنظومة الفلسفية لأرسطو هي العقيدة الكنسية، ولذلك أصبحت موضوعًا شرعيًّا للدراسة. وأثناء هذه العملية، أعيد طرح أسئلة أساسية تتعلق بطبيعة الحركة، وتحديدًا بواسطة مفكرين وعلماء في جامعة باريس وكلية ميرتون بأكسفورد بإنجلترا. كان كل من جين بوريدان Jean Buridan (١٢٩٥–١٣٥٨) ووليام أوف أوكام William of Ockham (١٢٨٥–١٣٤٩) من الطلاب المتميزين الذين يدرسون الحركة، وقد أصبحا من النقاد الجادين لبعض أفكار أرسطو. استعاد بوريدان هجوم فيليبونوس على تفسيرات أرسطو لحركة القذيفة. قدم بوريدان أمثلة لأجسام كان تفسير فكرة «التدعيم» بالنسبة لها، كما أكد، لا يعمل بوضوح، مثلًا رمح مدبب من طرفيه (كيف يمكن للهواء أن يدفع الطرف الخلفي المدبب؟) وعجلة الطاحونة (ليس له طرف خلفي بالمرة). كذلك رفض بوريدان التفسير البديل بأن عمودًا من الهواء المتحرك ينشأ أمام الطرف الأمامي وعلى طول جوانب القذيفة مما يحفظها متحركة. وقد أشار إلى أنه لو كان ذلك صحيحًا، لكان من الممكن أن يبدأ الإنسان في تحريك جسم ما، وبذلك يتكون عمود الهواء المتحرك أولًا، وقد فشلت كل المحاولات لعمل ذلك. توصل بوريدان مثل فيليبونوس إلى أن الجسم المتحرك لا بد أن يُعطى شيئًا ما يجعله يستمر في الحركة. وقد أطلق على هذا الشيء الدفعة Impulse، وكان

يعتقد أن الجسم الذي يحافظ على حركته فإنه يستخدم دفعته باستمرار. وعندما تستهلك الدفعة التي حصل عليها الجسم في الأصل، فإنه سيتوقف عن الحركة. وقد ربط بين هذه العملية وبين الحرارة المكتسبة بواسطة مذكّي النار الحديدي الموضوع في النار، فعندما يزال المذكي من النار، يكون قد اكتسب شيئًا ما بوضوح يحفظه ساخنًا. ومع ذلك يُستهلك الشيء الذي اكتسبه من النار ببطء، ويبرد المذَكّي. وكما سنرى، فإن دفعة بوريدان في الحقيقة قريبة تمامًا من الوصف الصحيح للواقع الكامن الذي قدمه في النهاية جاليليو ونيوتن.

كان هناك نقد آخر لفيزياء أرسطو، ففي ١٢٧٧ أدان مجلس ديني في اجتماع له بباريس عددًا من رسائل أرسطو، بما فيها وجهة النظر القائلة باستحالة الفراغ. وقد توصل المجلس إلى استنتاج أن الرب قد يخلق الفراغ إذا شاء هو ذلك. وبجانب النقد الخاص من بوريدان، أنتج العلماء في ذلك العصر لأول مرة، وصفًا دقيقًا وتعريفات لأنواع الحركة المختلفة، وأدخلوا التمثيل البياني ليساعدهم في دراستهم. وقدمت تلك المساهمات أساسًا بواسطة السكولاستين Scholastics في باريس والميرتونيانيين Mertonians في إنجلترا، الذين أمدونا بتجريد أفضل ومثالية جعلت من الممكن إجراء صياغات أدق لمشكلات الحركة. كانت المقدرة على المثالية والتعريفات الأفضل أساسية للتقدم بعد ذلك. فمثلًا في ذلك الوقت لأول مرة تُفهم فيها أنواع الحركة بطريقة واضحة. تم تعريف الحركة المنتظمة Uniform بأنها الحركة في خط مستقيم بسرعة ثابتة. أما الحركة غير المنتظمة التي نسميها الآن الحركة المتسارعة accelerated فكانت تُفهم على أنها تقابل الحركة التي يصاحبها تغير السرعة أو تغير الاتجاه. أما الحركة المتسارعة المنتظمة (الحركة منتظمة التغير) فهي الحركة التي تغير من سرعتها بمعدل ثابت، مثلًا: السيارة التي تتسارع بمعدل ميل في الساعة كل عشر ثوان تتحرك حركة متسارعة منتظمة. وقد جعلت هذه التعريفات الدقيقة من الممكن صياغة أوصاف أكثر دقة للحركة بما في ذلك حركة الأجسام الساقطة والقذائف. وكان من المفيد بوجه خاص تطور الأشكال البيانية لتصور الحركة. ولأول مرة تمكن العلماء من تمثيل الحركة التي يمكن تحليلها وتصنيفها. ونوعا الحركة مبينان على مثل هذا التمثيل البياني في شكل ٣-١، وهذا الشكل يرصد السرعة مع الزمن. ويمثل الخط الأفقي المستقيم سرعة ثابتة، وهي الحركة المنتظمة. أما الخط المستقيم ذو الميل فيمثل الحركة المتسارعة، أي السرعة التي تتزايد باستمرار مع الزمن. وفي الواقع، نظرًا لأنه خط مستقيم، فإن السرعة تتغير بمعدل ثابت، ويمثل الخط المائل الحركة المتسارعة المنتظمة.



شكل ٣-١: الحركة المنتظمة والحركة المتسارعة المنتظمة مبينتان على رسم بياني للسرعة مع الزمن.

كانت هذه التطورات في غاية الأهمية لأنها جعلت من الممكن، ولأول مرة، تحليل الحركة بدقة وبالتفصيل، سواء كانت سقوط الأجسام أو القذائف، بمدلول أنماط نوعية من الحركة. وكان تعريف الحركة المنتظمة والحركة المتسارعة المنتظمة حاسمًا لوصف الحركة بصورة ملائمة، من أجل اكتشاف الطبيعة الكامنة وراء الحركات. وكانت الأشكال البيانية مطلوبة من أجل التعرف الصحيح على هذه الأنماط المختلفة للحركة في القياسات التجريبية. وهكذا تم إعداد المسرح أخيرًا ليقوم شخص ما بالتحديد الدقيق لنوع الحركة المتضمنة في الأجسام الساقطة والقذائف.

ميكانيكا جاليليو

قام جاليليو جاليلي (١٥٦٤–١٦٤٢) لأول مرة بتحديد نوع الحركة بالضبط التي تحدث للأجسام الساقطة. ولد جاليليو ونشأ في شمال إيطاليا مباشرة بعد ظهور عصر النهضة الإيطالية. كان ذلك زمن النزاع الديني والسياسي وزمن النشاط الفكري والأدبي في كل أوربا: الإصلاح والإصلاح المضاد، والأرمادا الإسبانية، وعهد الملكة إليزابيث الأولى في إنجلترا، ومقالات مونتاين Montaigne في فرنسا، ومسرحيات شكسبير في إنجلترا. وقد أظهر جاليليو قدرات غير عادية في العديد من المجالات وهو بعد شاب (من المحتمل أنه كان سيصبح رسامًا متميزًا) ودرس الطب في جامعة بيزا، أحد أفضل مدارس أوربا. لكنه أصبح مهتمًّا مبكرًا بالرياضيات والفلسفة الطبيعية



جاليليو
(إهداء من أرشيف تحرير الصور الملونة).

(العلم بالمصطلحات الحديثة) وأظهر مقدرات كثيرة حتى إنه عُين أستاذًا للرياضيات في بيزا وهو ما زال في منتصف العشرينيات من عمره.

وقد عانى من صعوبات مع أعضاء هيئة التدريس الآخرين في بيزا (كان عدوانيًّا، معتزًا بنفسه ومتكبرًا)، فانتقل جاليليو وهو في الثامنة والعشرين ليشغل كرسي الرياضيات في بادوا حيث ظل هناك عشرين عامًا تقريبًا. وقد أسس لنفسه سمعة أنه أحد أعظم العلماء في زمنه، وأسهم إسهامات هامة في مجالات عديدة من العلم والتكنولوجيا.

أصبح جاليليو مقتنعًا وهو في باكورة حياته المهنية بأن الكثير من العناصر الأساسية في فيزياء أرسطو كانت على خطأ. ويظهر أنه سرعان ما أصبح كوبرنيكيًّا، على الرغم من أنه لم يعلن عقيدته فيما يتعلق ببنية السماوات إلى أن استخدم التلسكوب ليدرس الأجسام في السماء الليلية حوالي سنة ١٦١٠، عندما كان تقريبًا في السادسة والأربعين. وما هو أكثر أهمية فيما يخص موضوع الميكانيكا، أن جاليليو قد أصبح كذلك مقتنعًا بأن وصف أرسطو لكيفية سقوط الأجسام واستمرار القذائف في الحركة كان خطأ تمامًا.

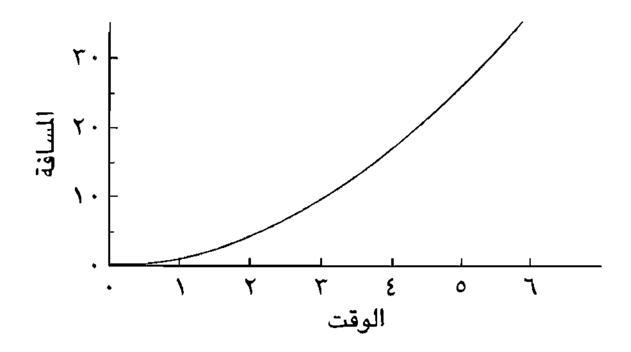
وبدا أن جاليليو قد صار مهتمًّا بكيفية سقوط الأجسام عندما كان شابًّا لا يزال طالبًا في بيزا، على الرغم من أنه ليس صحيحًا أن جاليليو قد أجرى تجارب على الأجسام الساقطة من برج بيزا المائل. كان قد تحقق من ضرورة «إبطاء» عملية السقوط ليتمكن من قياس حركة الجسم الساقط. كما أن جاليليو قد أيقن كذلك أن طريقة حل هذه المشكلة يجب ألا تغير من الطبيعة الأساسية لعملية «السقوط».

من جهة أخرى، شعر جاليليو بقوة بأن أي تأثيرات مقاومة قد تحجب الطبيعة الأساسية لحركة السقوط. وكان يعتقد أن على المرء أن يحدد أولًا كيف تسقط الأجسام في غياب أي تأثيرات مقاومة، ثم يهتم بعد ذلك بتأثيرات الوسط المقاوم على حده، وبعدها يجمع الاثنين معًا للحصول على الناتج النهائي. والنقطة الهامة هنا أن جاليليو شعر بأن الطبيعة الأساسية لعملية السقوط لا تتضمن مساهمات الوسط المقاوم. لذا فقد أراد أن يجد طريقة أخرى لإبطاء السقوط دون أن يغير من الطبيعة الأساسية للعملية.

ركز جاليليو على حالتين شعر بأنهما تحققان مطلبه. كانت الحالة الأولى هي البندول، الذي كان قد درسه أول مرة وهو طالب. أما الحالة الثانية فكانت كرة تنحدر إلى أسفل على مستوى مائل. وفي كلتا الحالتين كان يعتقد أن السبب الكامن وراء الحركة هو نفسه المسئول عن السقوط (الجاذبية). دفع جاليليو بأن الحركات التي درسها لا بد أن يكون لها الخصائص الأساسية ذاتها، لكنها لا بد أن تقتصر فيما يخص البندول والكرات المنحدرة على المستويات المائلة. وقد حصل على الاستنتاجات نفسها من دراسته للحالتين.

ولنأخذ في اعتبارنا الحالة الثانية، أي المستوى المائل، بشيء من التفصيل. باختيار مستوى مائل ميلًا ليس كبيرًا، يمكن إبطاء العملية لنتمكن من ملاحظتها. غير أن جاليليو فعل ما هو أكثر من مجرد ملاحظة حركة الكرة المنحدرة، فقد درس بعناية إلى أي مدى سترحل الكرة خلال فترات زمنية مختلفة. وكان قادرًا على رسم شكل بياني للكرة الساقطة يمثل المسافة مقابل الزمن؛ لأنه عرف كيف يحدد نوع الحركة من هذا الرسم. (زعم جاليليو أنه أول من عرف الحركة المنتظمة والحركة المتسارعة المنتظمة، على الرغم من أنه لم يكن هو الأول.)

ومن المهم أن نفهم أنه في ذلك الوقت لم تكن مثل تلك القياسات سهلة. وقد جاء نجاح جاليليو من مهارته وعبقريته كتجريبي ومن تفكيره الحاسم. فمثلًا، لم تكن هناك ساعات إيقاف دقيقة، لذا كان على جاليليو أن يصمم طرقًا يقيس بها فترات



شكل ٣-٢: التمثيل البياني للمسافة مقابل الزمن في تجارب جاليليو على المستوى المائل. والبيانات من جدول ٣-١ تناسب الرسم.

متساوية من الزمن بدقة. وقد بدأ في قياس الزمن مرارًا وتكرارًا في الفترات التي بين الضربات (الإيقاع) الموسيقية التي يقوم بها موسيقيٌّ جيد. أما التقنية النهائية فكانت استخدام ساعة مائية، كانت تقيس الوقت بكمية المياه (تحدد بالوزن) التي تتراكم عندما يسمح لها بالسريان بمعدل ثابت. وكانت مستوياته المائلة بطول عدة أقدام ومستقيمة وملساء على كل طولها.

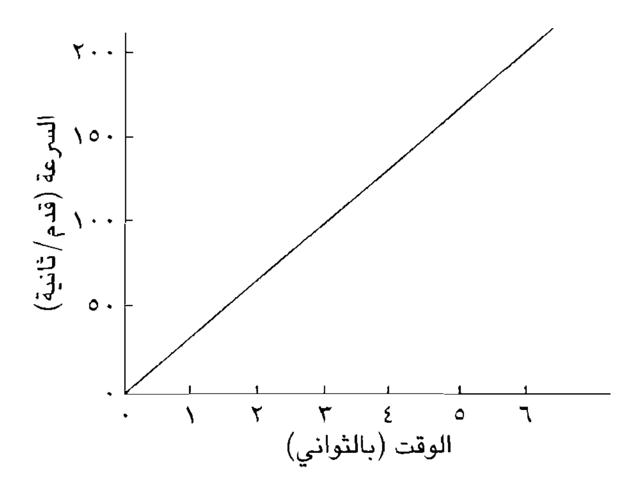
نتائج تجارب جاليليو مع المستويات المائلة ممثلة في شكل مبسط في الجدول ٣-١ ومرصودة في الشكل ٣-٢. وقد اتخذت المسافة المقطوعة في نهاية الوحدة الزمنية الأولى كوحدة للمسافات. تزداد المسافة المقطوعة متناسبة مع مربع الزمن المقطوع. وبذا ففي نهاية وحدتين من الزمن كانت الكرة قد انحدرت أربع وحدات من المسافة، وفي نهاية ثلاث وحدات من الزمن، كانت قد انحدرت تسع وحدات من المسافة، وهكذا. كان جاليليو قادرًا على استيعاب هذا التقدم (والشكل المقابل له) كصيغة دلالية على الحركة المتسارعة المنتظمة. فمثلًا يمكن تحويل البيانات في جدول ٣-١ إلى سرعة مقابل الزمن في رسم بياني مماثل لذلك الذي ناقشناه فيما يتعلق بالشكل ٣-١. فإذا فعلنا ذلك، فسنحصل على الشكل ٣-٣، الذي يبين خطًّا مستقيمًا له ميل. وكما ناقشنا سابقًا، فهذه النتيجة يحصل عليها المرء للحركة المتسارعة المنتظمة. السرعة تتزايد بمعدل ثابت. وهكذا أصبح جاليليو قادرًا على تحديد كيفية سقوط الأشياء تجريبيًّا: بحركة متسارعة منتظمة. وهذا هو نوع حركة الأجسام الساقطة عندما يتم استبعاد تأثيرات الوسط المقاوم، وهو نوع الحركة التي تميز أبسط عمليات سقوط الأجسام.

جدول ٣-١: المسافة المقطوعة في أزمنة مختلفة في تجربة المستوى المائل.

الفترة الزمنية	المسافة المقطوعة
٠	٠
١	١
٢	٤
٣	٩
٤	١٦
—	—

كان جاليليو يدرك بكل تأكيد أن الأجسام الساقطة في الهواء أو في السوائل لا تظل تسقط أسرع وأسرع، أي أنه كان يعرف أن مقاومة الوسط ستتسبب في النهاية في توقف التسارع، وأن سرعة السقوط ستصل إلى قيمة ثابتة. وعمومًا تسمى هذه السرعة النهائية القصوى الآن باسم: السرعة الحدية Terminal للجسم الساقط. كان جاليليو يعلم كذلك أن الأجسام الثقيلة (الأكثف) تسقط عادة أسرع خلال الهواء من الأجسام الأخف (الأقل كثافة). (وهذا بالضبط عكس ما يدعي غالبًا من استنتاج تم التوصل إليه من تجارب برج بيزا المائل.) والنقطة هنا أن جاليليو قد تحقق أن هذه النتيجة كانت بسبب «تداخل» مقاومة الهواء. وقد كانت بكل دقة نتيجة تأثيرات مقاومة الهواء (أو السائل) هي التي جعلت جاليليو يقرر أنه في حاجة لدراسة السقوط بواسطة البندول والمستويات المائلة، وبذلك يحتفظ بالسرعة بطيئة بما يكفي لتقليل تأثيرات الوسط إلى الحد الأدنى. وحتى نفهم النتيجة النهائية لعملية السقوط نأخذ في اعتبارنا الشكل ٣-٤.

يمثل الشكل السرعة المتجهة (السرعة) لكل من الجسم الثقيل والجسم الخفيف كدالة من الزمن. يمثل الخط المائل حركة الجسم الساقط بتسارع ثابت (منتظم)، وهي حركة الجسم الذي يسقط في الفراغ. وفي أي شيء عدا الفراغ تزداد مقاومة الوسط مع زيادة السرعة إلى أن تتساوى قوة المقاومة مع قوة الجاذبية إلى أسفل، وهنا يتوقف التسارع (العجلة). وستعتمد السرعة الحدية للجسم ليس على وزنه فقط ولكن كذلك على حجمه وشكله. وقد تصل السرعة الحدية لشخص يسقط (السابح في الهواء مثلًا) إلى ١٣٠ ميلًا في الساعة، حسب وضع الجسم، والملابس، وهكذا. وتبين الخطوط المستقيمة في الشكل ٣-٤ نوع الحركة التي تنبأ بها أرسطو

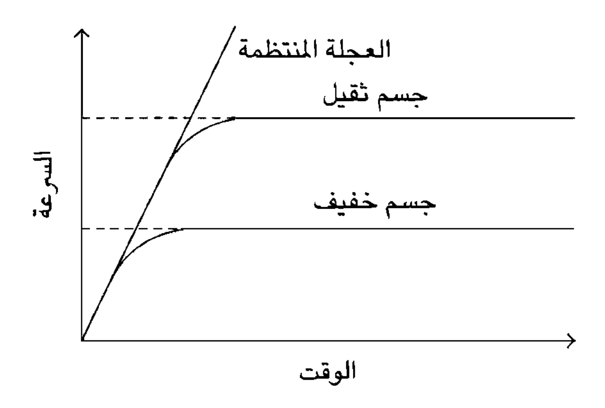


شكل ٣-٣: نتائج تجربة المستوى المائل لجاليليو مبينة على رسم بياني للسرعة مقابل الزمن.

للأجسام الخفيفة والثقيلة. ويمثل هذان الخطان سرعات ثابتة (وإن كانت مختلفة)، دون أي إشارة إلى الزمن اللازم الذي يتسارع خلاله الجسم من الصفر حتى سرعة حدية نهائية.

وعلى الرغم من أنه من المهم فهم الحركة الحقيقية لجسم يسقط، كما هو موضح في الشكل ٣-٤، من وجهة النظر العلمية، فإن الأكثر أهمية هو فهم الطبيعة الحقيقية («الواقعية الحقيقية» في رواية الكهف لأفلاطون) للسقوط، مع إهمال مقاومة الوسط. أكد جاليليو بحسم أن الطبيعة الحقيقية هي أن الأجسام لا بد أن تسقط بحركة تسارع منتظمة كما هو مبين في الشكل ٣-٣. كانت تلك خطوة في غاية الأهمية نحو فهم عملية السقوط. وبمجرد معرفة «كيف» لحركة السقوط، يصبح من الضروري معرفة «لماذا» تسقط الأشياء. وقد أمدَّنا إسحاق نيوتن بفهم لماذا، وهو الذي ولد تقريبًا في العام الذي توفي فيه جاليليو. ومع ذلك، قبْل مناقشة مساهمات نيوتن نضع في اعتبارنا بعض المساهمات الهامة الأخرى في علم الميكانيكا بواسطة جاليليو، والعلاقة العامة بين الرياضيات والعلم.

وكجزء من دراسات جاليليو للأجسام المنحدرة إلى أسفل على المستويات المائلة، تمكن جاليليو من التوصل إلى تعميمين في غاية الأهمية فيما يتعلق بالحركة عمومًا. وكان كل من هذين التعميمين ينطبق مباشرة على مشكلة أرسطو القديمة، كيف يفسر حركة القذيفة.



شكل ٣-٤: التمثيل البياني لحركة الأجسام الخفيفة والثقيلة أثناء سقوطها.

لاحظ جاليليو أن الكرة التي تنحدر أسفل المستوى المائل تمارس باستمرار تسارعًا منتظمًا (جدول ٣-١)، حتى وإن كانت زاوية الميل صغيرة جدًّا. وقد تساءل جاليليو ما الذي يمكن أن يحدث لكرة تتحرك إلى أعلى المستوى المائل. وقد اكتشف أن كرةً تبدأ الحركة على سطح أملس بحركة منتظمة (سرعة ثابتة) ستعاني من تباطؤ منتظم (أي تسارع سالب) إذا تدحرجت إلى أعلى على مستوى مائل. ولأن هذين الاستنتاجين يبدوان حقيقيين دائمًا، حتى بالنسبة للزوايا المتناهية الصغر في الميل، فقد توصل إلى استنتاج أنه إذا تغيرت زاوية السقوط من زاوية صغيرة لأسفل إلى زاوية صغيرة لأعلى، فإن التسارع (العجلة) لا بد أن يتغير من قيمة ضئيلة موجبة إلى قيمة ضئيلة سالبة، ولا بد من وجود زاوية ليس يقابلها تسارع. ولا بد أن تكون هذه الزاوية هي المقابلة للمستوى الأفقي، بلا ميل مهما كان صغيرًا.

كان تحليل جاليليو في غاية لأهمية لأنه، كما تحقق، إذا لم يمارس أي تسارع على الكرة التي تتدحرج على مستوى مسطح ولا أي تباطؤ، فإنها طبيعيًّا ستظل تتدحرج إلى الأبد. أي أن جاليليو قد أيقن أن الكرة التي تتدحرج على طول سطح مستوي تمامًا ستظل بالطبع تتدحرج بسرعة ثابتة إلى أن يؤثر عليها أي شيء (مثل الاحتكاك أو الميل إلى أعلى) يجعلها تبطئ من حركتها. وهكذا تعرف جاليليو على أن سؤال أرسطو «لماذا تظل القذيفة تتحرك؟» مع أنه يثير قضية هامة جدًّا، فإنه كان السؤال الخطأ. فلا بد أن يكون السؤال: «لماذا» تتوقف القذيفة عن الحركة؟» أيقن جاليليو أن الأمر الطبيعي بالنسبة لجسم يتحرك أفقيًّا هو أن يستمر في الحركة المنتظمة.

أمسك جاليليو بهذه النتيجة ليفسر كيف يمكن للأرض أن تسلك مثل الكواكب الأخرى دون أن يتطلب الأمر وجود آلة لتدفعها (المشكلة التي واجهناها أول مرة في فصل ٢). فكر جاليليو أن أفقيًّا هي موازٍ لسطح الأرض، وبذا فهو دائري. وهكذا من الطبيعي أن تتحرك الأجسام في مسارات دائرية، دون أن يتطلب الأمر آلة، إلا إذا كان هناك نوع من المقاومة التي ترجع إلى الوسط، أما إذا كانت الأرض تتحرك في «فراغ خال» Vacuum، فلا يمكن أن توجد مقاومة، والأرض يمكن أن تتحرك في مدار دائري إلى الأبد، تمامًا مثل ما اقترح كوبرنيكوس. ولا بد أن يتحرك الغلاف الجوي للأرض معها، وبذلك لن تكون هناك مشكلة الرياح العاتية كتداعيات لحركة الأرض. ولكن للأسف توصل جاليليو لاستنتاج خطأ من هذا الجانب من تجاربه عن الكرات التي تتدحرج. فالكرة التي تتدحرج على سطح مستوى كانت تتحرك بحق في خط مستقيم، وليس على سطح مواز لسطح الأرض.*

ونحن نطلق الآن على الخاصية التي تجعل الجسم يظل متحركًا، القصور الذاتي inertia. ولعل أكثر الأمثلة دلالة درامية على القصور الذاتي، هو حركة سفينة فضاء في الفضاء «الخارجي». ولنتذكر كيف سافر رواد الفضاء إلى القمر. أولًا انطلقت سفينة الفضاء التي تقلهم من قاعدة كاب كانافيرال Cape Canaveral لتضعهم في مدار حول الأرض. بعد تحديد أن كل شيء على ما يرام، يشغلون محركات الصواريخ لبضع دقائق من أجل مغادرة مدارهم الأرضي ويتجهون إلى القمر، وحال وصلوهم إلى السرعة المناسبة والاتجاه المضبوط، يطفئون المحركات. ومن هناك كان في استطاعتهم الهبوط بفعل الجاذبية لمدة ثلاثة أيام تقريبًا يقطعون فيها ٢٤٠٠٠٠ ميل إلى موعدهم مع القمر. وأحيانًا (لكن ليس دائمًا) كانوا يحتاجون إلى إشعال محركاتهم لبضع دقائق عند منتصف الطريق تقريبًا، ليس بهدف تغيير سرعتهم ولكن لتطبيق «تعديل المسار بمنتصف الطريق» على اتجاههم. والشاهد هنا هو أن الرحلة استخدمت القصور الذاتي لسفينة الفضاء لتظل في حركة بسرعة كبيرة ثابتة (حوالي ٣٠٠٠ ميل في الساعة) طوال الطريق من الأرض إلى القمر. وقد سار ذلك بشكل جيد أساسًا لعدم وجود مقاومة احتكاك على السفينة في الفضاء. (في الواقع،

*قد يكون سوء الفهم هو السبب في فشل جاليليو في التعرف على مغزى مدارات القطع الناقص (Elliphical) لكبلر. كان جاليليو يعتقد في المدارات الدائرية، وكان متأكدًا أن تجاربه قد أثبتت صحة ذلك، وكان من الصعب تفسير المدارات غير الدائرية. وليس قبل زمن إسحاق نيوتن، عندما قدم التفسير الصحيح في فيزياء مدارات الكواكب.

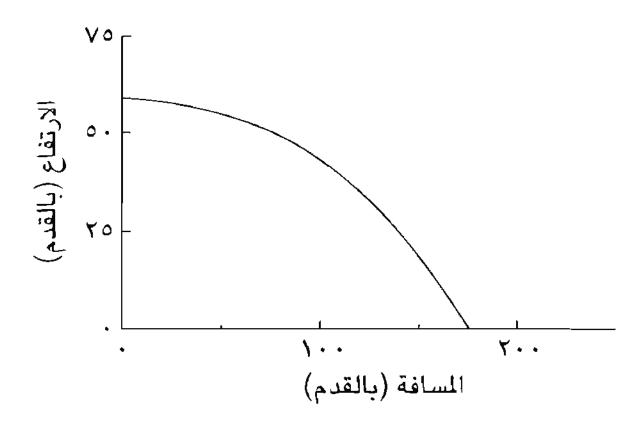
كانت السفينة تبطئ من سرعتها بعض الشيء إلى أن تتغلب قوى جاذبية القمر على جاذبية الأرض فتزداد سرعتها بعض الشيء.)

وهكذا أجاب جاليليو عن سؤال أرسطو بالإشارة إلى أنه من الطبيعي أن يظل الجسم المتحرك في حركته. ولكن جاليليو لم يتناول لماذا كان ذلك هو الحالة الطبيعية. لكن كان المهم أولًا تحديد ما تفعله الطبيعة قبل طرح السؤال لماذا تحدث الأشياء بالطريقة التي تحدث بها. وهكذا تعرف جاليليو لأول مرة تعرفًا منضبطًا (كما فعل بالضبط مع الأجسام الساقطة) على ما يحدث أثناء الحركة الأفقية. وفي الحقيقة استمر جاليليو في التعامل مع حركة القذيفة، وهو المثال الذي حير أرسطو.

أيقن جاليليو أن الأمر المحير فيما يخص حركة القذيفة (من قذف أو ضرب الجسم) أنها تضمنت حركات أفقية ورأسية معًا. وكان قد حدد بالفعل أن الحركة الأفقية «الصرفة» كانت حركة منتظمة في خط مستقيم. لكن الآن، هل يجب أن يجتمع هؤلاء لوصف حركة القذيفة؟ واجه جاليليو هذا السؤال أيضًا في مستوياته المائلة والبندول في دراسة السقوط. وكان كل من هذين النظامين يتضمن حركات أفقية ورأسية مجتمعة. ولأنه اكتشف أن الكرات التي تتدحرج إلى أسفل المستويات المائلة تبدي دائمًا حركة متسارعة منتظمة، دون النظر إلى ميل المستوى (على الرغم من زيادة قيمة التسارع كلما ازداد الميل)، فإن جاليليو استنتج أن تأثيرات السقوط كانت مستقلة عن الحركة الأفقية. ولأنه وجد أن كل تجاربه مع كل من المستويات المائلة والبندول قد أعطت نتائج متسقة مع فرضيته، فإنه استنتج أخيرًا أنه كان دائمًا صحيحًا. وهكذا توصل جاليليو إلى ما عرف باسم مبدأ التركيب Superposition، الذي ينص على أن الأجسام التي لها حركة مجمعة أفقية ورأسية فإن الحركتين يمكن تحليلهما منفصلتين ثم ضمهما لنحصل على النتيجة النهائية (المحصلة).

ووفقًا لمبدأ التركيب، تتضمن حركة القذيفة كلًّا من الحركة الأفقية والرأسية، اللتين يمكن تحليلهما منفصلتين إحداهما عن الأخرى. وهكذا، فالحركة الرأسية هي مجرد حركة سقوط — حركة السقوط نفسها التي يمكن أن يتوقعها المرء من الأجسام التي ليس لها حركة أفقية. وبالمثل، فإن الحركة الأفقية حركة منتظمة بأي سرعة امتلكها الجسم في البداية. والحركة المجمعة الناتجة لجسم تم قذفه أفقيًّا من بعض الارتفاعات ممثلة بالشكل ٣-٥.

وسيرتطم الجسم الذي قذف به مع الأرض بعد فترة من الزمن مساوية للفترة التي استغرقها الجسم الذي أسقط من الارتفاع نفسه. سيتحرك الجسم الذي رمي



شكل ٣-٥: التمثيل البياني للارتفاع مقابل المسافة لجسم أُلقي أفقيًّا من ارتفاع ما.

به أفقيًّا بالسرعة الأفقية التي ألقي بها إلى أن يصطدم بالأرض. فمثلًا، لو كانت السرعة الأفقية للجسم ٦٠ ميلًا في الساعة (٨٨ قدمًا في الثانية) ويستغرق ثانيتين ليسقط على الأرض (وهي الحالة التي تبدأ من ارتفاع ٦٤ قدمًا)، فإن الجسم سينتقل ١٧٦ قدمًا أفقيًّا (٨٨ قدم/ثانية × ٢ ثانية). ولتلاحظ أن مبدأ التركيب ينص على أن الرصاصة التي تطلق أفقيًّا من مسدس قوي، والرصاصة التي تلقى من الارتفاع نفسه، ستصطدمان بالأرض في اللحظة نفسها. فالرصاصة التي أطلقت من المسدس لها ببساطة سرعة أفقية ابتدائية عالية، وهي قادرة على الحركة أفقيًّا لمسافة كبيرة خلال الفترة الزمنية القصيرة. (من الواضح أن هذه النتيجة لا تنطبق على جسم يطير في الهواء، أو يحقق بعض الارتفاع بطريقة ما من حركته الأفقية. وهي صادقة فقط في الفراغ.)

طبق جاليليو كذلك مفهوم حركة القذيفة على تفاحة (مثلًا) تسقط من الشجرة المثبتة في سطح الأرض المتحرك. تكتسب التفاحة حركتها «الأمامية» وهي تسقط، وهكذا لا تتخلف، كما يدعي بعض معارضي نظرية مركزية الشمس.

كانت المحصلة النهائية لكل مساهمات جاليليو في تطوير علم الميكانيكا عظيمة، فقد حدد بالضبط كيف تسقط الأشياء، وأدخل فكرة القصور الذاتي للأجسام المتحركة. وكان قادرًا على تصحيح تحليل مفاهيم أرسطو حول الأجسام الساقطة، كما كان قادرًا على الإجابة عن سؤال لماذا تظل القذيفة تتحرك. ومع ذلك، لم يقدم جاليليو «لماذا» عديدة حول الحركة. وكما سنرى، كان إسحاق نيوتن هو الذي قدم «لماذا» لحركة السقوط.

المنطق والرياضيات والعلم

قبل مناقشة مساهمات نيوتن في علم الميكانيكا، من الضروري أن نناقش بعض الخطوات والأدوات الذهنية للعلم. وبالتحديد من الضروري التمييز بين المنطق الاستقرائي والمنطق الاستدلالي، ونشير إلى قيمة الرياضيات واستخدامها في العلم. ومن المهم أن نفهم أساسًا ما الأمور المتضمنة في فروع الرياضيات المعروفة باسم الهندسة التحليلية وحساب التفاضل والتكامل، التي تقدم تقييمًا أفضل لمساهمات نيوتن، وكيف قام بها. (وستكون هذه المناقشات مفيدة أيضًا لمادة الفصول التالية.)

يستخدم نوعان أساسيان من المنطق في العلوم، فعندما يجمع المرء نتائج سلسلة من التجارب ويستخلص منها قاعدة عامة، فإن هذا المنطق يقال له استقرائي. فمثلًا، إذا استنتجنا من عدة عمليات مسح بعناية أن الناس يفضلون مشاهدة العروض الغامضة عن كل العروض الأخرى، فهنا استُخدم المنطق الاستقرائي. وقد حصلنا على القاعدة العامة مباشرة من التجربة وليس من خلال أي خط من خطوط التفكير بدءًا بمبادئ أساسية معينة.

كان الفيلسوف الإنجليزي الشهير فرانسيس بيكون Francis Bacon (١٥٦١–١٦٢٦) مناصرًا شديدًا جدًّا للطريقة الاستقرائية. وكان يعتقد أن المرء إذا استطاع تصنيف واستحضار قائمة بالحقائق المتاحة حول موضوع معين، فستصبح القوانين الطبيعية التي تحكم الموضوع واضحة لكل طالب جاد. بينما من المؤكد حقيقة أن يكون قد ساهم بعدة مساهمات هامة في العلم بهذه الطريقة في بعض دراساته وتجاربه، فإنه من الحقيقي كذلك أنه لم ينجز أي هدف من أهدافه المعلنة، وهي إعادة ترتيب المنظومة الكلية للمعرفة البشرية بتطبيق قوة الفكر الاستقرائي. وقد اعتمد اعتمادًا أكثر من اللازم على هذا النوع من التفكير فقط.

والنوع الآخر الأساسي من المنطق هو الاستدلالي. وفي هذا الأسلوب من المنطق، يبدأ المرء من بضعة مبادئ أساسية أو نظريات ثم يبدأ في المجادلة بأن نتائج معينة أخرى لا بد أن تنبع. وهكذا، إذا رأى المرء أن كل الناس تحب أن تقرأ الألغاز الجيدة، ثم دفع بأنه لذلك فإن الألغاز ستكون عروضًا تلفزيونية لها شعبية كبيرة، فالمرء يستخدم هنا المنطق الاستدلالي. ربما كان الفيلسوف الفرنسي رينيه ديكارت Rene Descartes (١٥٩٦–١٦٢٠) هو أقوى المناصرين للطريقة الاستدلالية. وكان يعتقد أن على المرء ألا يصدق الملاحظات (بما في ذلك التجارب) ليكشف عن حقائق الكون، وكان ديكارت يعتقد أن على المرء أن يبدأ فقط من بضعة مبادئ غير قابلة

للتفنيد، ثم يجادل انطلاقًا منها بطريقة منطقية لتحديد طبيعة الكون. وعلى الرغم من أن ديكارت ساهم مساهمات هامة كثيرة في الفلسفة والرياضيات (طور الكثير في موضوع الهندسة التحليلية التي سنناقشها فيما بعد)، فإنه بسبب إصراره على البدء بعدد قليل من المبادئ التي ليس مصدرها الملاحظة، كما رغب في ذلك، لم يستطع الحصول على وصف متسق للكون الفيزيائي.

وقد قام إسحاق نيوتن بالجمع بين الطريقتين الاستقرائية والاستدلالية بحنكة. وقد بدأ ببعض الملاحظات النوعية المعينة وأخذ يعمم منها ليصل إلى نظرية تبين القانون الفيزيائي العام الذي يمكن أن يصف الظاهرة. وبمجرد وصوله إلى نظرية، يصبح في إمكانه استنتاج التداعيات منها ليتنبأ بظواهر جديدة يمكن اختبارها بالملاحظة. فإذا لم تتأكد التنبؤات، فإن عليه أن يحاول تعديل النظرية إلى أن تصبح قادرة على القيام بوصف ناجح للظواهر الملائمة. كانت نظرياته تبدأ دائمًا من الملاحظات (الطريقة الاستقرائية)، وكانت تختبر بواسطة التنبؤ بظواهر جديدة (الطريقة الاستدلالية)، وقد رأى نيوتن، عن حق، أن الطريقتين ضروريتان في تحديد القوانين الفيزيائية للطبيعة.

وقبل مناقشة بعض المفاهيم الرياضية الأساسية التي كانت قد تطورت تقريبًا في أيام جاليليو ونيوتن (وبعضها بواسطة نيوتن نفسه) والتي كانت ضرورية بالنسبة لنيوتن في توليفه لعلم الميكانيكا، من الملائم عمومًا أن نناقش لماذا نحتاج الرياضيات غالبًا في وصف القوانين الفيزيائية.

يمكن القول إن الرياضيات هي علم الترتيب والعلاقات. وهكذا، حيث إن العالَم الفيزيائي هو أجزاء مرتبة ومرتبطة بعلاقات، فإن الرياضيات يمكن أن تطبق لدراسته. ومن المذهل بعض الشيء أن العالم مرتب وتترابط أجزاؤه معًا: ومن الجائز أن العالم لم يكن مرتبًا ولم تكن أجزاؤه مترابطة معًا، على الرغم من أن مثل هذا العالم من الصعب تخيله. ومع ذلك، ما زال من المذهل أنه كلما علمنا أكثر عن الكون، عرفنا أكثر أنه مرتب وأنه فيما يبدو يتبع قواعد معنية أو قوانين. (وكما قال أينشتاين: «أكثر الأشياء غير المفهومة حول الكون أنه مفهوم.») وكلما وجدنا أن الكون أكثر ترتيبًا وارتباطًا، أمكن تطبيق الرياضيات أكثر لوصفه.

وقد تبع تطور الفيزياء غالبًا تطور الرياضيات. وأحيانًا يحدث أن تدين بعض مجالات الرياضة في نشأتها للحاجة إلى حل مشكلة محددة أو فئة من المشكلات في الفيزياء. وقد لاحظنا بالفعل كيف أن كبلر كان قادرًا على استنتاج الشكل الصحيح

لمدارات الكواكب بسبب معرفته بالأشكال الهندسية، بما في ذلك القطع الناقص (البيضوي الشكل). وقد استخدم اللوغاريتمات باستفاضة، التي كانت قد اخترعت لتوها، في الكثير من حساباته. وبالمثل، كان جاليليو في حاجة إلى تعريفات ملائمة للحركة، وتقنية بسيطة معينة للرسم البياني ليستطيع تحديد الطبيعة الحقيقية للسقوط. وسنرى اعتمادًا متزايدًا على الرياضيات كلما تقدمنا، ولا بد لنا الآن أن ندخل تطورين رياضيين جديدين، من أجل مناقشة أعمال نيوتن.

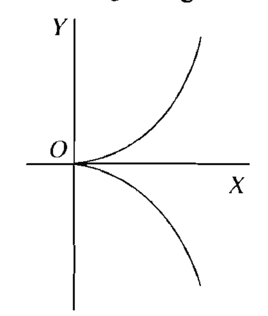
ولاستخدام الرياضيات في وصف الحركات الفيزيائية والأشكال، من الضروري أن نجد طرقًا لتجميع الجبر مع الهندسة. ويسمى وصف الأشكال الهندسية بواسطة المعادلات الرياضية (والعكس) بالهندسة التحليلية، وهو مجال قد تطور كثيرًا قبل زمن نيوتن مباشرة.

ويمكن وصف معظم الأشكال البسيطة وكثير من الأشكال المعقدة بواسطة المعادلات الرياضية. ويمدنا الشكل ٣-٦ بأمثلة عديدة. فتوصف الدائرة بمعادلة بسيطة، مثل شكل القطع الناقص. وتتضمن بعض الأنساق المعقدة دوالَّ من حساب المثلثات (جا Sine، جتا Cosine، وأمثالها) في الوصف الجبري لها. ومن الضروري لنا هنا أن نفهم كيف يمكن الحصول على هذه الأوصاف الجبرية (المعادلات) أو حتى كيف تعمل. والمهم هو أن نكون واعين بأن مثل هذه الأوصاف الجبرية للأشكال موجودة غالبًا ومعروفة.

وأثناء مناقشتنا لأنواع الحركات ودراسات جاليليو للأجسام الساقطة، كنا نجد أحيانًا أنه من الضروري وصف الحركة على رسم بياني للسرعة مقابل الزمن، وأحيانًا أخرى على رسم بياني للمسافة مقابل الزمن. وقد بينا أن بعض هذه الرسوم البيانية مترابطة، فمثلًا، كيف تظهر الحركة المنتظمة على هذين النوعين من الرسوم البيانية. وعمومًا، فإن التقنيات الرياضية من أجل ربط سمات هذين الشكلين من الرسوم البيانية هي جزء من موضوع معروف باسم حساب التفاضل والتكامل. فمثلًا، تقابل المساحة تحت منحنى السرعة مقابل الزمن المسافة الكلية المقطوعة.

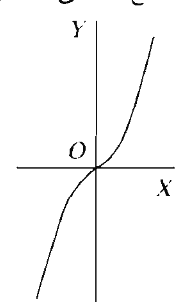
ويتناول موضوع حساب التكامل integral calculus التقنيات الرياضية لإيجاد المساحة تحت أي منحى توجد له معادلة رياضية (هندسة تحليلية). وبالمثل، فإن ميل الرسم البياني للمسافة مقابل الزمن يدل على سرعة جسم، أما ميل الرسم البياني للسرعة مقابل الزمن فيعطي التسارع. وتعتبر التقنيات الرياضية لتحديد ميل المنحنيات التي تصفها معادلات رياضية جزءًا من موضوع حساب التفاضل.

قطع مكافئ شبه مكعب



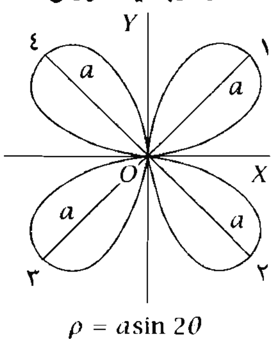
$y^2 = ax^3$

قطع مكافئ مكعب



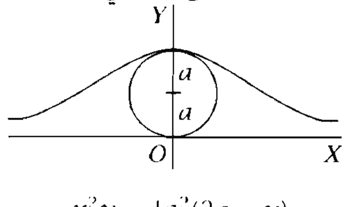
$y = ax^3$

زهرة رباعية الأوراق



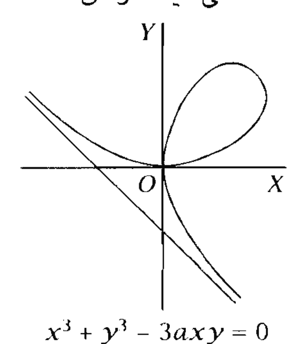
$\rho = a\sin 2\theta$

منحنى أجنيسي



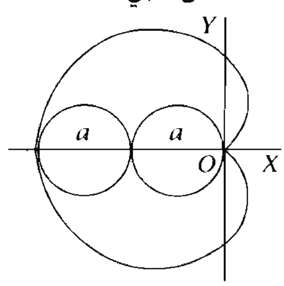
$x^2y = 4a^2(2a - y)$

منحنى ديسكارتس



$x^3 + y^3 - 3axy = 0$

منحنى قلبي الشكل



$x^2 + y^2 + ax = a\sqrt{x^2 + y^2}$

$\rho = a(1 - \cos\theta)$

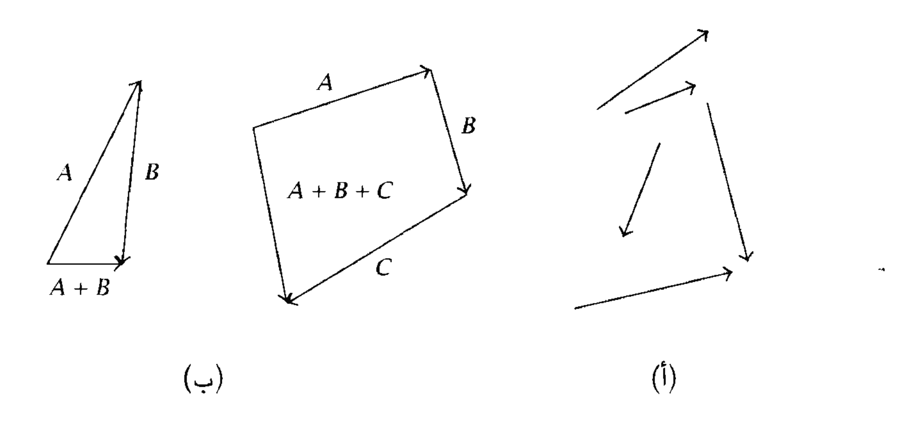
شكل ٣-٦: المعادلات الرياضية المختلفة وتمثلها بيانات (بتصريح من جرانفيل W. A. Granville، وسميث P. F. Smith، ولونجلي W. R. Longley، «عناصر حساب التفاضل والتكامل» Elements of Differential and Integral Calculus، نيويورك: جون وايلي وأبناؤه، ١٩٦٢).

وينسب إلى إسحاق نيوتن وإلى عالم الرياضيات والفيلسوف الألماني جوتفريد لايبنتيز Gottfried Leibnitz (١٦٤٦–١٧١٦) شرف اختراع حساب التفاضل والتكامل كل بمفرده. وقد أجرى كل منهما أبحاثه مستقلًا، ولكنهما وصلا إلى النتائج الأساسية نفسها لحساب التفاضل. وكون نيوتن قد طور الأفكار والطرق في حساب التفاضل، بالتأكيد مكنه ذلك من التوصل إلى بعض استنتاجاته فيما يتعلق بالميكانيكا وقانون الجاذبية العام. وقد استخدم حساب التفاضل والتكامل ليس فقط للترجمة من رسم السرعة مقابل الزمن إلى المسافة مقابل الزمن والعكس، ولكن كذلك لإيجاد المساحات والحجوم وكتل الأشكال والجوامد.

وأخيرًا، لا بد أن نعترف بحقيقة أن بعض الكميات لها اتجاه ومقدار (حجم). فمثلًا إذا قلنا إن السيارة تسافر بسرعة ٣٠ ميل في الساعة، فإننا لم نصف حركتها كاملة. فعلينا أن نعلن كذلك في أي اتجاه تسافر السيارة. ويطلق على الكميات التي تتطلب منطقيًّا اتجاهًا ومقدارًا كميات متجهة vector quantites. والكمية المتجهة المرافقة للحركة تسمى متجه السرعة velocity. فإذا ذكرنا مقدار السرعة فقط، فإننا نشير إلى السرعة speed. فإذا قلنا إذن إن السيارة تسافر بسرعة ٣٠ ميلًا في الساعة متجهة شمالًا، فإننا نكون قد حددنا أنها سرعة متجهة Velocity.

وليست السرعة المتجهة هي الكمية الوحيدة المتجهة؛ فالقوة مثال آخر على ذلك. عندما تؤثر قوة في جسم ما، فإن لها شدة معينة واتجاهًا معينًا لا بد من بيانه من أجل الوصف التام. وبالمثل، التسارع (الموجب والسالب) دائمًا له معدل وفي اتجاه معين، لذا فهو أيضًا كمية متجهة. وهكذا، فالحركة الدائرية، حتى لو كانت سرعتها ثابتة، هي حركة متسارعة لأن اتجاهها دائم التغير.

ولا تتطلب بعض الكميات اتجاهًا، وإنما تتطلب مقدارًا فقط. وتسمى مثل هذه الكميات «كمية لا تحتاج إلى اتجاه» بلا اتجاه Scalar quantities. فكتلة الجسم (بالكيلو جرام مثلًا) لا تحتاج إلى اتجاه ولذا فهي كمية بلا اتجاه scalar. كذلك طول الجسم هو الآخر بلا اتجاه. وتضم الأمثلة الأخرى الشحنة الكهربية ودرجة الحرارة والجهد. فالسرعة بلا اتجاه Speed كمية بلا اتجاه scalar، أما السرعة المتجهة Velocity فهي متجه. ولأن المناقشة الملائمة للحركة تتضمن أفعال القوى المؤثرة، فإنها لا بد أن تتضمن اتجاهات، ومن المناسب أن تستخدم كميات متجهة. وكما سنرى لاحقًا، كان نيوتن على دراية جيدة بالحاجة إلى استخدام الكميات المتجهة في وصفه للحركة، وقد اقترح نقطة خاصة لإدخال هذه الكميات المتجهة بعناية.



شكل ٣-٧: المتجهات (أ) أمثلة لمتجهات ممثلة بأسهم. (ب) أمثلة لجمع المتجهات بيانيًّا.

ولأن الكميات المتجهة لها مقدار واتجاه، فإنه يمكن تمثيلها بيانيًّا بأسهم، كما في شكل ٣-٧. ويتناسب طول السهم مع مقدار المتجه، ويمثل اتجاه السهم وموضع رأسه الاتجاه. والعمليات الرياضية البسيطة التي تجرى على الأعداد العادية لا تزيد تعقيدًا عندما تجرى على الكميات المتجهة إلا بقدر يسير، بما في ذلك الجمع والطرح والضرب. وفي هذا الفصل والفصول التالية، يكفي أن نصف بيانيًّا كيفية جمع المتجهات. ولجمع متجهين أو أكثر توضع رأس أحدها في ذيل الآخر، مع الحفاظ على اتجاهها وتوجهها، ويرسم خط نهائي من ذيل السهم الأول إلى رأس السهم الأخير. ويمثل هذا السهم الأخير متجه حاصل الجمع للمتجهات المنفردة، كما هو موضح في الشكل ٣-٧(ب). (إحدى النتائج المثيرة لجمع المتجهات أن حاصل جمعها قد يكون مقدارًا أصغر من كل مقدار من المقادير التي ساهمت في حاصل الجمع.)

ميكانيا نيوتن

نحن الآن مستعدون لمناقشة مساهمات إسحاق نيوتن (١٦٤٢–١٧٢٧) في علم الميكانيكا. وتمثل أعماله بحق إجابات كاملة عن الأسئلة التي طرحها أولًا أرسطو والتي كانت موضوع هذا الفصل. وفي الحقيقة تمثل أعمال نيوتن إحدى أعظم المساهمات التي أجراها شخص واحد في الفهم البشري للعالم الفيزيائي، وسيكون من الصعب المبالغة في تقدير تأثير أعماله على الفكر الغربي. فقد طور صورة العالم فكأنه ساعة تعمل بدقة ووضوح تفصيلي وتدور ببطء وفقًا لقواعد محددة جيدًا.

ولد إسحاق نيوتن في ١٦٤٢، أي بعد وفاة جاليليو بعام واحد. وقد أكمل نيوتن أعمال جاليليو ووسعها بعدة طرق هامة، وبالذات فيما يخص الميكانيكا. وكان

نيوتن مثل جاليليو عالمًا مسيطرًا في جيله. وقد أحدث مساهمات هامة في الرياضيات والبصريات والظواهر الموجية والميكانيكا والفلك. وكانت كل واحدة من مساهماته عظيمة الأهمية كافية لترسيخ مكانته في التاريخ.

أصبح نيوتن مهتمًّا بالتصميمات التجريبية وهو بعد طفل، وقد استعرض مقدرته على إجراء تصميمات أصيلة لطواحين الهواء والساعات المائية والمزاول الشمسية. ونظرًا لإمكانياته الهائلة فقد تمكن من الالتحاق بجامعة كمبريدج، حيث أبدى مقدرة رياضية استثنائية. وبعد تخرجه عام ١٦٦٥ عاد نيوتن إلى البيت الذي أمضى فيه باكورة شبابه في وولشورب Woolshorpe بلنكولنشاير Lincolnshire حيث عاش مع أمه الأرملة، وكان ذلك زمن الطاعون الكبير في أوربا (تسبب الطاعون في وفاة حوالي ٣١٠٠٠ نسمة من لندن وحدها في غضون عامين) والحريق الكبير الذي أتى على معظم لندن. أمضى نيوتن الفترة من ١٦٦٥ إلى ١٦٦٧ في عزلة شبه تامة في وولشورب. ومن الواضح الآن أنه خلال هذين العامين قد قام بصياغة نظرية المعادلات ذات الحدين binomial في الرياضيات، وقام بتطوير حساب التفاضل والتكامل، ودرس تحليل الضوء الأبيض إلى طيفه (باستخدام المنشور) وبدأ دراسة الميكانيكا، بما في ذلك قانون الجاذبية العام. لم يُنشر أيٌّ من هذه الأعمال مباشرة، وظل بعضها غير منشور مدة ثلاثين عامًا، لكن هذين العامين كانا من بين أكثر الأعوام إنتاجية في حياة عالم.

عاد نيوتن في ١٦٦٧ إلى كمبريدج محاضرًا. وقد أصبح معلم نيوتن في كمبريدج، عالم الرياضيات المشهور إسحاق بارو Isaac Barraw، متأثرًا بأعمال نيوتن وبقدراته تأثرًا جعله يتنحى عن كرسي الرياضيات الخاص به في ١٦٦٩ ليذهب الكرسي إلى نيوتن. وهكذا وجد نيوتن نفسه في وضع يستطيع منه أن يتابع دراساته المختلفة بحرية. وللأسف، لم يتلق العلماء الإنجليز الآخرون أعمال نيوتن الأولى المنشورة في مجال البصريات بترحاب. وسرعان ما أدرك نيوتن الحقيقة وأصبح مترددًا في نشر أي شيء على الإطلاق. تراجع نيوتن وانسحب إلى دراساته في السيمياء alchemy واللاهوت وأقوال أنبياء الإنجيل (كان نيوتن مسيحيًّا متشددًا.)

وفيما بعد، وباتباع بعض المقترحات الهامة من روبرت هوك Robert Hooke وتحت إلحاح صديقه الفلكي إدموند هالي Edmund Halley (الذي سُمي باسمه المذنب الشهير)، قام نيوتن بإنهاء بحثه في الميكانيكا الذي كان قد بدأه منذ عشرين سنة تقريبًا. وفي ١٦٨٧ نشر أكثر أعماله أهمية: «المبادئ الرياضية للفلسفة

الطبيعية» Principia Mathematica philosophia Naturalis، ويسمى باختصار برينكيبيا principia — مكتوبًا باللاتينية كما كانت تكتب جميع الأبحاث العلمية في ذلك الوقت. وتمثل البرينكيبيا أحد أعظم إنجازات العقل البشري، وربما العمل المفرد الأكثر أهمية على الإطلاق في تاريخ الفيزياء.

بالتأكيد كانت أعمال نيوتن استمرارًا للعمل المبكر لأرسطو وكبلر وخاصة جاليليو. وقد حصل كذلك على أفكار هامة من باكون وديكارت وهوك. وقد قال نيوتن نفسه: «إذا كنت قادرًا على الرؤية البعيدة إلى هذه الدرجة، فذلك لأنني كنت أقف على أكتاف العمالقة.» ومع ذلك، فقد كانت أعماله أكثر من التكوين العظيم لكل الفكر الذي تم إنجازه من قبل، ونتيجة لنشر البرينكيبيا رسخت أقدام نيوتن كفيلسوف طبيعي بارز في عصره. وقد خدم بعد ذلك في البرلمان (كممثل لجامعة كمبريدج)، ثم أصبح مأمورًا لدار سك النقود في لندن. وفي النهاية تفوق نيوتن تمامًا على كل من شوهوا سمعته، بل أصبح رئيسًا للجمعية الملكية الموقرة، وذا قدرة لا تبارى في دنيا العلم.

كان نيوتن شخصًا غيورًا وأنانيًا ومغرورًا ومعقدًا ومثيرًا للمشاكل. وكان مشتت الذهن وعازفًا بإصرار عن الزواج، وكانت ابنة أخيه ترعاه. وكان فولتير Voltaire وألكسندر بوب Alexander Pope من المعجبين به، بينما كان يزدريه كل من جوناثان سويفت Jonathan Swift ووليام بليك William Blake. وقد قدم أكثر المساهمات أهمية في العلم على الإطلاق، وقد قامت أعماله بمرافقة وإرشاد موجة جديدة من التفاؤل فيما يخص مقدرة الإنسان على فهم العالم.

كانت برينكيبيا نيوتن مكتوبة بأسلوب منطقي حاسم وبديهي، متبعًا المثال الذي وضعه عالم الرياضة الإغريقي القديم إقليدس في كتابه الشهير عن الهندسة. وقد قدم نيوتن عددًا من التعريفات الأساسية والافتراضات، وقام بتعريف ما أطلق عليه «كميات أساسية» Fundamental و«مشتقة» derived، ثم قدم بعد ذلك قوانينه الثلاثة عن الحركة وبضعة قوانين أخرى، متضمنة قانونه العام عن الجاذبية، وكانت كلها قائمة على الاستقراء من التجارب. وبعد ذلك، أثبت بواسطة الاستدلال المنطقي أن كل الحركات المشاهدة للأجسام في العالم الفيزيائي، بما في ذلك الحركة السماوية، والحركة المحلية الطبيعية، وحركة القذائف؛ هي ببساطة تبعات لتعريفاته وقوانينه للحركة. وتقف الـبرينكيبيا كشرح بسيط ولكن مذهل وبارز لطبيعة الحركة. ولم نتمكن من وضع أي تحديدات على منظومة نيوتن إلا في العصر الحديث فقط مع

تطور النسبية وميكانيكا الكم. وهذه التحديدات هامة فقط بالنسبة للمنظومات التي تتضمن ظروفًا حدية متطرفة: سرعات عالية وأحجام صغيرة ودرجات حرارة منخفضة جدًّا.

وتبدأ تعريفات نيوتن بكمية المادة، التي يصفها بأنها حاصل ضرب الكثافة في حجم الجسم. وتصف هذه الكمية «كم من الجوهر» في هذا الجسم، ونطلق عليها الآن «كتلة» mass. أما كمية الحركة فتعرف بأنها حاصل ضرب كمية المادة في الجسم في سرعته — أي كتلته مضروبة في سرعته المتجهة (mv) — وهي كمية متجهة vector وتسمى «كمية الحركة» أو «الزخم» momentum. ويساهم كل من الكتلة والسرعة في كمية الحركة. فسيارة النقل التي تزن ١٠ أطنان وتسافر بسرعة ٢٠ ميلًا في الساعة لها كمية حركة أكبر من سيارة صغيرة تسير بسرعة ٥٠ ميلًا في الساعة، لأن سيارة النقل تزن عشرة أضعاف السيارة الصغيرة، بينما للسيارة الصغيرة سرعة أكبر من سيارة النقل مرتين ونصف فقط.

وقد أدخل القصور الذاتي inertia كخاصية كامنة متأصلة في الكتلة وتصف مقاومتها للتغير في حالة الحركة المنتظمة في خط مستقيم (سنناقشها بالتفصيل فيما بعد). وأخيرًا قام نيوتن بتعريف القوة المفروضة Impressed Force على أنها الفعل الذي يمكن أن يغير من حالة الحركة (كمية الحركة) للجسم. وعادة، يفكر المرء في القوة المفروضة على الأرجح على أنها إما أن تسرع أو تبطئ الجسم. وقد عرف نيوتن أنه من الممكن لقوة ما أن تغير اتجاه حركة الجسم دون أن تغير من سرعته، وتسمى مثل هذه القوة بالقوة المتجهة للمركز centripetal. ومثال ذلك جسم مربوط (مثبت) إلى وتر يدور في دائرة. وقد يدور الجسم بسرعة «ثابتة» إلا أن اتجاهه يتغير باستمرار. وهذا التغير في الاتجاه هو نوع من التسارع وتتسبب فيه القوة المفروضة من الوتر.

أدخل نيوتن بعد ذلك «كمياته الأساسية»، التي كان مطلوبًا أن تكون قابلة للقياس وموضوعية — أي أنها مستقلة عن الحالة الذهنية للشخص الذي يشاهدها. وفوق ذلك، كانت رغبته أن يكون هناك فقط عدد قليل من هذه الكميات؛ ليكون الوصف الكامل للعلم قائمًا على أصغر عدد ممكن من الأفكار الأساسية. وقد احتاج فقط إلى ثلاثة من هذه الكميات الأساسية: الزمن والطول والكتلة. كانت هذه تقاس بمدلول الوحدات الأساسية. والوحدات العلمية الحديثة هي الثانية والمتر (٣٩٫٣٧ بوصة) والكيلو جرام (يساوي ٢٫٢ رطل)، على الترتيب. وقد فرضت دراسة الكهرباء

والحرارة ضرورة إدخال كميتين أساسيتين إضافيتين: الشحنة الكهربية (الكولوم) ودرجة الحرارة (الكلفن).

ومن الممكن التعبير عن كل الكميات الأخرى بمدلول الكميات الأساسية، فمثلًا: يعبر عن السرعة كنسبة الطول إلى الزمن (ميل في الساعة). ومقدار كمية الحركة هو حاصل ضرب الكتلة في السرعة (الكتلة مضروبة في نسبة الطول إلى الزمن.) وتصبح الكميات الأخرى أكثر تعقيدًا، لكنها دائمًا يمكن التعبير عنها بمدلول الكميات الأساسية. فمثلًا طاقة الحركة هي نصف حاصل ضرب كمية الحركة في مربع السرعة (حيث إن وحداتها الكتلة مضروبة في مربع نسبة الطول إلى الزمن.)

وبعد تعريفه للمفاهيم والكميات بعناية، كان نيوتن قادرًا على اقتراح قوانينه الثلاثة عن الحركة ببساطة شديدة. وكانت تهدف هذه القوانين إلى تحديد العلاقة بين القوى المفروضة والتغير في حركات الجسم.

١- القانون الأول للحركة: قانون القصور الذاتي

> في غياب أي قوة خارجية، سيستمر الجسم في حالة حركة منتظمة (بما في ذلك السكون) في خط مستقيم.

وكما بينا سابقًا، فإن هذا القانون قد اعترف به جاليليو قبل أن يولد نيوتن، وكان يمثل إعادة صياغة لسؤال أرسطو من «لماذا تظل الأجسام تتحرك؟» إلى «لماذا تتوقف الأجسام عن الحركة؟» وينص هذا القانون ببساطة على أن كل الأجسام التي لها كتلة لها خاصية مشتركة تسمى القصور الذاتي، وهي التي «تبقي الأجسام على حالتها السابقة قاصرة عن تغيير حالتها» ومع ذلك، فقد نطق نيوتن القانون بشكل صحيح في اعترافه بأن حركة القصور الذاتي هي في خط مستقيم، وليست حركة دائرية.

٢- القانون الثاني للحركة: قانون التسارع

> زمن معدل التغير في الحركة (كمية الحركة) لجسم يتناسب طرديًّا مع مقدار القوة المؤثرة وفي اتجاه القوة المؤثرة.

ويربط هذا القانون بين تسارع جسم والقوة المؤثرة عليه. ولتلاحظ أن كمية الحركة هي الكتلة مضروبة في السرعة، ولذا إذا لم تتغير كتلة جسم ما فإن تغير كمية

الحركة يتضمن تغير السرعة، وهو الذي يسمى التسارع (العجلة). وحيث إن هذا القانون ينص على أن تسارع جسم ما (كتلته ثابتة) يتناسب مع القوة المؤثرة. وتؤدي مضاعفة القوة إلى مضاعفة التسارع، ومضاعفتها ثلاث مرات سيضاعف التسارع ثلاث مرات. ولتلاحظ أن كلًّا من القوة المؤثرة والعجلة الناتجة كميات متجهة vector، لها اتجاهات نوعية، وتبعًا للقانون، لا بد أن تكون في الاتجاه نفسه. ويصلح القانون الثاني لنيوتن ليخبرنا كيف يعتمد تسارع جسم ما على كل من القوة المؤثرة وكتلة الجسم. واعتماد التسارع على الكتلة يدخل هنا لأن القانون ينص على أن المعدل الزمني للتغير في كمية الحركة هو الذي يتناسب مع القوة المؤثرة، لأن كمية الحركة هي حاصل ضرب الكتلة في السرعة المتجهة. وبذا إذا كانت كتلة جسم ما كبيرة، فإن أي تغير صغير في السرعة المتجهة سينتج عنه تغير كبير في كمية الحركة. وهذا فيما يخص قوة مؤثرة معينة سينتج عنها تغير معين في كمية الحركة، بينما سيكون التسارع أكبر فيما يخص جسمًا ذا كتلة صغيرة منه بالنسبة لجسم ذي كتلة كبيرة. ونحن نقول رسميًّا بأن تسارع جسم ما يتناسب طرديًّا مع محصلة القوة المؤثرة وعكسيًّا مع كتلة الجسم.

ومن الأمور الحاسمة أن تفهم ماذا يعني «يتناسب عكسيًّا» فإذا كانت A تتناسب عكسيًّا مع B، يعني ذلك أن B لو صارت أكبر، فإن A سيصغر، والعكس بالعكس. ولتلاحظ أنه لو كانت A تتناسب طرديًّا مع B وصارت B أكبر، فإن A لا بد أن تكبر. وأحد الأمثلة على «التناسب الطردي» هو تغير طول زنبرك مشدود يزداد بزيادة قوة الشد. وأحد الأمثلة على «التناسب العكسي» هو حجم البالون المملوء بالهواء الذي يتناقص كلما ازداد ضغط الغلاف المحيط به.

وهكذا يخبرنا قانون نيوتن الثاني بأن تسارع جسم ما يتناسب طرديًّا مع القوة المؤثرة وعكسيًّا مع كتلة الجسم. وهذا معقول بالطبع، لأننا نعلم أننا لو دفعنا أو شددنا الجسم بقوة فإنه سيسرع من حركته، وأن الجسم لو كان أثقل (أكثر كتلة)؛ فإن الكمية نفسها من الدفع أو الشد لن يكون لها التأثير نفسه. وتعطي الآلات الأكبر تسارعًا أكبر، إلا أن السيارات الأثقل تنقص من هذا التسارع. ولكن قانون نيوتن الثاني يذهب أبعد من مجرد تعريفنا كيف يرتبط التسارع بالقوة المؤثرة كيفيًّا، ويخبرنا كيف يرتبط التسارع بالقوة المؤثرة وبالكتلة بشكل كمي. ويخبرنا القانون أن التسارع لا يتناسب طرديًّا مع الجذر التربيعي للقوة، مثلًا، أو التكعيبي، أو أيًّا ما كان، ولكنه ببساطة يتناسب مع مقدار القوة (أي مرفوعة للأس ١). وبالمثل، يبين

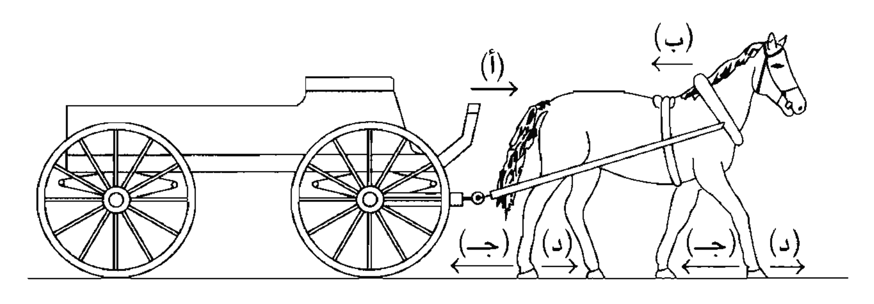
القانون الثاني أن التسارع يتناسب عكسيًّا مع الكتلة بطريقة كمية معينة. ويمنحنا قانون نيوتن الثاني المقدرة على حساب كم سيكون تسارع الجسم الناتج من قوة معينة إذا عرفنا الكتلة. ويستخدم العلماء والمهندسون هذه المعادلة ربما أكثر من أي معادلة أخرى في حساباتهم. فهي تطبق على السيارات، وسفن الفضاء، والصواريخ، وكرات المطاط، والجسيمات تحت الذرية. وهي على الأرجح أكثر المعادلات المستخدمة بمفردها في الفيزياء.

٣- القانون الثالث للحركة: قانون الفعل ورد الفعل

> إذا مارس جسم قوة على جسم ثان، فإن الجسم الثاني سيمارس عليه قوة مساوية لها في اتجاه عكسي.

تكمن في هذا القانون فكرة أن القوى تمثل التداخل بين الأجسام، وبينما يركز القانونان الأول والثاني على حركة الجسم المفرد، فإن القانون الثالث ينص على أن القوى تتواجد لأن هناك أجسام أخرى. ومتى مارس جسم قوة على جسم ثان، فإن الجسم الثاني يمارس قوة مساوية ومضادة في الاتجاه على الجسم الأول، وعلاقة القوة تماثلية.

فمثلًا إذا جر حصان عربة إلى الأمام على طول الطريق، فإن العربة في ذات الوقت تشد الحصان إلى الخلف، ويشعر الحصان بالقوة كرد فعل. وتدفع حوافر الحصان، في تماس مع الأرض، ضد سطح الطريق، إذا لم يكن الطريق زلقًا، وفي الوقت نفسه يدفع سطح الطريق بتماس ضد باطن حوافر الحصان. ومن المهم أن نتذكر أي قوى تؤثر على الحصان. إنها قوى رد الفعل لسطح الطريق التي تؤثر على حوافر الحصان، وهي التي «تدفع» إلى الأمام، وقوة رد الفعل للعربة التي تنتقل من خلال سرج الحصان إلى أكتافه، وهي التي «تجر» إلى الخلف. ومن أجل أن يتسارع الحصان، لا بد أن تزيد قوة سطح الطريق على حوافر الحصان عن قوة سرج الحصان على أكتافه. ولكن القوة المبذولة بواسطة حوافر الحصان تؤثر على الطريق، فإذا كان الطريق زلقًا فلن يكن هناك احتكاك كاف بين سطح الطريق وباطن حوافر الحصان، وسينزلق الحصان. ولن يتمكن الحصان من استخدام عضلاته القوية ليدفع بقوة كافية ضد سطح الطريق لتوليد قوة رد الفعل التي سوف تدفع الحصان إلى الأمام. وكل القوى المختلفة المتضمنة في عملية جر العربة بواسطة الحصان مبينة



شكل ٣-٨: أزواج القوة للحصان الذي يجر عربة. (أ) الحصان يجر العربة (من خلال السرج). (ب) العربة تشد الحصان إلى الخلف. (جـ) الحصان يدفع ضد سطح الطريق. (د) سطح الطريق يدفع إلى الخلف ضد حوافر الحصان.

بواسطة الأسهم في الشكل ٣-٨. ومن الضروري أن نعترف، مهما كان ذلك غريبًا، بأن قوة رد الفعل من سطح الطريق ضد حوافر الحصان هي التي تحرك الحصان إلى الأمام.

ومثال آخر على دور قوى رد الفعل والقانون الثالث للحركة تقدمه آلة الصاروخ. ففي الصاروخ، تندفع غازات بسرعة كبيرة من فتحة عادم غرفة الاحتراق. ويمارس الصاروخ قوة على الغازات ليدفعها إلى الخلف. وفي الوقت نفسه تمارس الغازات قوة رد فعل على الصاروخ لتدفعه إلى الأمام، وتقوم قوة رد الفعل هذه بتعجيل أو تسريع كتلة الصاروخ. (كان اسم إحدى الشركات الرئيسية المصنعة لآلات الصواريخ في خمسينيات القرن العشرين: موتورات رد الفعل Reaction Motors.)

٤- قانون الحفاظ على الكتلة

وبالإضافة لقوانينه الثلاثة عن الحركة، اعتبر نيوتن أنه من المهم أن يبين قانونين للحفاظ استنتج أنه لا بد أن يكونا صحيحين. وتعتبر الكمية قد تم الحفاظ عليها في الفيزياء إذا كانت كميتها الكلية ثابتة (دائمًا الكمية نفسها). وأبسط قوانين نيوتن للحفاظ يتعلق بالكتلة (كمية المادة). وكان يعتقد أن كمية الكتلة الكلية الموجودة في نظام مغلق بعناية ثابتة (النظام المغلق يعني ببساطة: ألا يسمح لأي شيء أن يدخل أو يغادر النظام موضوع الدراسة.) وبالتأكيد لا يتم الحفاظ على الكتلة في نظام ما إذا أضيف إليه مزيد من المادة. والأهمية الحقيقية لهذا القانون هي أن نيوتن كان يعتقد أن المادة لا يمكن أن تخلق أو تفنى. وقد اعترف بأن المادة قد تغير من شكلها، كأن تتغير من جامد إلى غاز أثناء الاحتراق. لكن نيوتن كان يعتقد أن المرء لو جمع

بعناية كل الدخان والرماد الناتج من احتراق جسم ما، لا بد أن يجد نفس الكمية الكلية من المادة التي كانت موجودة في البداية. ونحن نعلم الآن أن هذا القانون يتم خرقة بقدر ضئيل جدًّا في التفاعلات الكيمائية (مثل الاحتراق)، كما يتم خرقه بشدة في التفاعلات النووية. وتنشأ هذه الاختراقات لقانون نيوتن من العلاقة الشهيرة بين الكتلة والطاقة التي أوردها أينشتاين في النسبية، والتي سنناقشها فيما بعد.

٥- قانون الحفاظ على كمية الحركة

تمكن نيوتن باستخدام قانونيه الثاني والثالث من إثبات أنه متى تداخل جسمان معًا، فإن المجموع الكلي لكمية الحركة (مجموع كمية حركة الجسم الأول وكمية حركة الجسم الثاني) هو نفسه دائمًا، حتى ولو تغيرت كمية الحركة لكل منهما على انفراد نتيجة للقوى التي تمارس على كل منهما. وبذا إذا اصطدم جسمان (سيارة وسيارة نقل مثلًا) معًا، فإن مساريهما وسرعتيهما واتجاهيهما كل ذلك سيختلف في التو واللحظة بعد التصادم عما كان عليه قبل التصادم. وعلى الرغم من ذلك، إذا جمعت كمية حركة الجسم الأول قبل التصادم مع كمية حركة الجسم الثاني قبل التصادم، وقارنتها بمجموع كمية حركة الجسم الأول وكمية حركة الجسم الثاني بعد التصادم، فإن الناتج سيكون نفسه. ويسمى هذا بقانون الحفاظ على كمية الحركة، ويمكن تعميمه لينطبق على عدد كبير من الأجسام التي تتداخل فقط معًا.

وعلى الرغم من أن نيوتن قد استنبط قانون الحفاظ على كمية الحركة كتداعيات لقوانينه عن الحركة، إلا أنه من الممكن استخدام هذا القانون كافتراض ثم استنباط قوانين نيوتن منه. وفي الحقيقة، فإن النظريات الحديثة للنسبية وميكانيكا الكم تبين أن قوانين نيوتن صحيحة تقريبًا فقط وبالتحديد في السرعات العالية بالنسبة للجسيمات تحت الذرية، إلا أن قانون الحفاظ على كمية الحركة من المعتقد أنه دائمًا دقيق.

وكما ناقشنا سابقًا، فقد بين جاليليو أنه إذا استبعدت تأثيرات فوق الدفع إلى أعلى (في الطفو)، والاحتكاك، ومقاومة الهواء، فإن كل الأجسام تسقط في اتجاه سطح الأرض بالتسارع (العجلة) نفسه بالضبط، دون النظر إلى الكتلة أو الحجم أو الشكل. وقد بين كذلك أن القذائف، هي الأخرى (الأجسام التي يرمى بها إلى الأمام)، تسقط بينما تتحرك إلى الأمام. ويتحكم القصور الذاتي في حركتها الأمامية أو الأفقية، أما حركة السقوط المتزامن فإنه يحدث بالتسارع نفسه مثل أي جسم آخر

يسقط. وقد ترك الأمر لنيوتن ليحلل طبيعة القوة التي تتسبب في تسارع الأجسام الساقطة.

وقد اعتبر نيوتن أن الأجسام الساقطة تتسارع في اتجاه الأرض لأن الأرض تمارس قوى جذب عليها. ويقال إن الفكرة الأساسية لقانون الجاذبية قد واتت نيوتن عندما سقطت تفاحة على رأسه. وهذه الرواية غير حقيقية بالتأكيد، لكن نيوتن قد أبدى ملاحظته بأنه بينما كان يفكر كيف تصل الجاذبية لتشد إلى الأسفل أعلى تفاحة فوق الشجرة، لحظتها بدأ يتعجب إلى أي مدى تصل الجاذبية. كان يعرف أن جاذبية الأرض كانت ما تزال توجد في أعلى الجبال وتوصل إلى استنتاج أنها على الأرجح موجودة ولها تأثير في الفضاء. وأخيرًا، تعجب إذا ما كانت الجاذبية تصل حتى القمر، وفي الحقيقة هل يمكن أن تكون الجاذبية مسئولة عن بقاء القمر في مداره. اعترف نيوتن أن القمر في الواقع «يسقط» هو الآخر نحو الأرض، لأن سرعته تتغير دائمًا، ومتجه تسارعه عمودي على مساره الدائري، وبذلك فإنه يشير إلى الأرض في مركز مدار القمر. وهذه القوة، لأنها تغير من اتجاه القمر، فهي قوة متجهة نحو المركز centripetal، ناقشناها سابقًا. وبالمثل «تسقط» الكواكب نحو الشمس لأنه أثناء مساراتها البيضاوية المتسمة بخطوط منحنية تشير متجهات تسارعها نحو الشمس. ولأن التسارع لا يوجد إلا عندما تكون هناك قوة مفروضة، فإن الشمس لا بد أنها تمارس قوة على الكواكب. ولذا استنتج نيوتن أن النوع نفسه من القوة، قوة الجاذبية، لا بد أنها تؤثر خلال كل العالم.

وباستخدام قوانين نيوتن للحركة، والقياسات التجريبية لمدارات القمر والكواكب، من الممكن التفكير استقرائيًّا (استخلاص) في الشكل الدقيق لقانون قوة الجاذبية. فوفقًا لقانون نيوتن الثاني، إذا كانت القوة ثابتة، فإن الأجسام الأثقل لا بد أن تسقط في اتجاه الأرض بتسارع أقل من الأجسام الأخف. لذلك لا بد أن تمارس الأرض قوة أكبر على الأجسام الأثقل — لأنها تزن أكثر (والوزن قوة). وفي الحقيقة، لا بد أن تتناسب قوى الجاذبية على جسم ما بالضبط مع كتلة الجسم من أجل أن تملك كل الأجسام التسارع نفسه. ولذا فإن الأرض تمارس قوة على الجسم تتناسب مع كتلة هذا الجسم. لكن وفقًا لقانون نيوتن الثالث، لا بد أن تتناسب هذه القوة مع كتلة الأرض، لأنه من وجهة نظر الجسم ما الأرض إلا جسم آخر. ولا بد من تطبيق التناسب، ولذلك فإن قوة الجاذبية لا بد أن تعتمد على كل من كتلة الأرض وكتلة الجسم.

كان نيوتن يعرف أن تسارع القمر أثناء سقوطه تجاه الأرض (اعتبر أن القمر قذيفة) أقل كثيرًا من تسارع الأجسام التي تسقط بالقرب من سطح الأرض. (وبمعرفة أبعاد مدار القمر والزمن المطلوب ليقطع القمر مداره مرة كاملة — ٢٧,٣٣ يوم — أصبح قادرًا على حساب تسارع القمر.) وفي النهاية استنتج أن قوة جاذبية الأرض لا بد أن تعتمد على المسافة بين مركز الأرض ومركز الجسم (القمر في هذه الحالة). كانت المسافة بين مركز الأرض ومركز القمر أكبر ٦٠ ضعفًا من المسافة بين مركز الأرض وأي جسم على سطح الأرض. وكان تسارع «سقوط» القمر أبطأ ٣٦٠٠ مرة من تسارع سقوط أي جسم بالقرب من سطح الأرض. لكن ٣٦٠٠ تساوي ٦٠ مضروبة في ٦٠، لذلك من المستحسن أن نستنتج أن قوى الجاذبية تتناقص مع مربع المسافة إلى مركز الجسم الذي تُمارَس عليه الجاذبية. وبالنظر في كل هذه الاعتبارات، اقترح نيوتن قانونه للجاذبية.

٦- القانون العام للجاذبية

> تجذب كل جسيمة مادية في العالم كل جسيمة مادية أخرى بقوة تتناسب مع حاصل ضرب كتلتي الجسيمتين وتتناسب عكسيًّا مع مربع المسافة بين مركزيهما. وتتجه القوة على طول الخط الذي يصل بين مركزيهما.
>
> يمكن تمثيل مقدار القوة بالصورة الرياضية الآتية:
>
> $$F_{\text{gravity}} = Gm_1m_2/r^2$$
>
> حيث F_{gravity} مقدار القوة، وm_1 كتلة أحد الجسمين، وm_2 كتلة الجسم الآخر، وr المسافة بين مركزي الجسمين، وG ثابت التناسب (وهو المطلوب لاستخدام الوحدات المعرفة بالفعل للكتلة والمسافة والقوة).

ويشار إلى القانون العام للجاذبية بأنه قانون تربيع عكسي لأن مقدار القوة يتناسب عكسيًّا مع مربع المسافة بين الجسمين (راجع مناقشة قانون نيوتن الثاني أعلاه.) لم يكن نيوتن بالطبع أولَ شخص يعتبر أن قانون الجاذبية يمكن أن يكون قانون تربيع عكسي. كان عدد قليل من العلماء الأوربيين الآخرين يفكرون أو يعتبرون أن مثل هذا الارتباط موجود، وبالأخص الفيزيائي الإنجليزي روبرت هوك والفيزيائي الهولندي كريستيان هويجنز Christian Huygens. ولأنهم كانوا يفتقدون إلى خبرة نيوتن الرياضية (وبالأخص أفكار حساب التفاضل والتكامل)، مع ذلك، فقد كانوا

غير قادرين على إظهار أن قانونًا للتربيع العكسي يعمل ليصف الأجسام الساقطة وحركة القمر والكواكب.

وبقوانينه الثلاثة عن الحركة والقانون العام للجاذبية، استطاع نيوتن أن يتناول كل أنواع الحركة: الأجسام الساقطة على سطح الأرض، والقذائف، والأجرام السماوية في السماء. وتحديدًا، أصبح قادرًا على تفسير قوانين كبلر لحركة الكواكب. كما أنه استطاع أن يثبت أن القوانين الثلاثة لحركة الكواكب هي تداعيات رياضية منطقية لقوانينه عن الحركة ولقانونه العام عن الجاذبية. فمثلًا، باستخدام الشكل الرياضي للقانون العام للجاذبية للقوى المؤثرة في قانونه الثاني للحركة، كان نيوتن قادرًا على الحصول على المعادلة الرياضية للقطع الناقص (البيضاوي) (مستخدمًا الهندسة التحليلية)، وبذا فسر قانون كبلر الأول لحركة الكواكب. وبالمثل كان قادرًا على «تفسير» لماذا يتحرك الكوكب في مداره البيضاوي (القطع الناقص) بسرعات متغيره (قانون كبلر الثاني)، وكيف أن فترة الدورة الكاملة في المدار تعتمد على البعد من الشمس (قانون كبلر الثالث).

ولا ينطبق قانون نيوتن للجاذبية على الأرض والقمر فقط، ولكنه ينطبق كذلك على الأرض والشمس، وعلى الكواكب الأخرى والشمس، وعلى كوكب المشتري وأقماره، وهكذا. والتحليل المماثل للأرض والقمر ينطبق بنجاح مثل الأمثلة الأخرى. وينطبق قانون الجاذبية وقوانين الحركة الأخرى على المجموعة الشمسية. وفوق ذلك، تبين الأدلة الفلكية أن هذه القوانين تنطبق كذلك على العالَم بمقياس أكبر. والظاهر أن هذه القوانين عالمية بحق.

وتسمح لنا قوانين نيوتن أن نذهب أبعد من قوانين كبلر لحركة الكواكب. ولأن قانون نيوتن للجاذبية يبين أن كل الأجسام المادية تمارس قوة جاذبية على كل الأجسام الأخرى، فإننا نعلم أن الكواكب لا بد أن تخضع لجذب ليس فقط من الشمس بل فيما بينها كذلك. وهكذا، لا بد أن تقوم الكواكب بإحداث اضطرابات في مدارات بعضها البعض، لذلك تصبح المدارات الناتجة ليست قطعًا ناقصًا تمامًا (ليست بيضاوية تمامًا). وكان نيوتن معنيًّا بتأثيرات تلك الاضطرابات. وكان يعتقد أن مدارات الكواكب قد تكون غير ثابتة بما فيه الكفاية بحيث تقوم قوى الشد للكواكب الأخرى بدفع الكوكب ليغادر مداره. وقد ضمن نيوتن أن التدخل الإلهي قد يكون مطلوبًا لتحتفظ الكواكب بمداراتها. وبعد قرن تقريبًا، بين عالم الرياضيات والفلكي الفرنسي الشهير بيير لابلاس Pierre Laplace (١٧٤٩-١٨٢٧) أن مدارات

الكواكب ثابتة ومستقرة بالفعل، بحيث لا تغادر الكواكب مداراتها على الرغم من أنها — أي المدارات — ليست بيضاوية، حتى لو حدث لها اضطراب.

وفي النهاية، فإن الاضطراب الذي تسببه قوى جاذبية الكواكب بعضها على بعض يمدنا ببعض من أكثر الأدلة إقناعًا بصحة قوانين نيوتن. وفي ١٧٨١ اكتُشِفَ كوكب جديد أطلق عليه اسم أورانوس. وباستخدام تقنيات رياضية متطورة لحساب تأثيرات كل الكواكب الأخرى على مدار أورانوس، وبحلول١٨٢٠ أصبح واضحًا أن هناك تفاوتًا بين المدار المشاهد والمدار المحسوب. وبالتشكك في وجود كوكب آخر في المجموعة الشمسية، تمكن أخيرًا كل من الفلكي الفرنسي ليفريير Leverrier والفلكي الإنجليزي آدامز Adams من حساب الموقع الذي لا بد أن يوجد فيه الكوكب الجديد، وما هي كتلته؛ ليفسر التفاوتات. وفي ١٨٤٦، اكتُشِفَ نبتون بالضبط في الموقع الذي تنبأ به العالمان. وبدراسة مدار الكوكب الجديد نبتون بعناية شديدة، اتضح أنه ما زال هناك كوكب آخر لا بد من وجوده. وفي ١٩٣٠، تم اكتشاف بلوتو وتم إزالة البقية غير المفسرة من الاضطرابات. وما زال الجدل مستمرًّا حول ما إذا كانت هناك أي بقايا من الاضطرابات في مدارات كل الكواكب، بعد أخذ قوى جاذبية كل الكواكب المعروفة الآن في الحسبان. والاضطرابات المتبقية صغيرة، وقد تكون فقط مجرد أخطاء طفيفة في المشاهدات الصعبة — أو ربما هناك كوكب آخر.

والنقطة الهامة في اضطرابات الكواكب هي أنها في النهاية، قد قدمت اختبارًا متميزًا لقوانين نيوتن. وقد تم التنبؤ بتأثيرات كل الكواكب بعضها على بعض ومشاهدة ذلك، وكان الخضوع للقوانين مذهلًا. وفي حالة الكوكب عطارد فقط كانت الحسابات بعيدة بشكل واضح عن القوانين. وفيما يخص عطارد فإن النظرية النسبية لأينشتاين مطلوبة لحل هذا التفاوت (راجع فصل ٦).

وبالإضافة إلى مدارات الكواكب، تبين أن قوانين نيوتن عالية الدقة في الكثير من المواقف الفيزيائية. فمثل هذه الحسابات فيما يخص الكواكب يجرى استخدامها فيما يخص مدارات الأقمار الصناعية حول الأرض. ويتولى الجمع المناسب بين قوانين نيوتن الثلاثة والقانون العام للجاذبية تفسير حركات كل القذائف. وتستخدم قوانين نيوتن يوميًّا بواسطة المهندسين والعلماء لوصف حركة كل شيء من القطارات إلى الجسيمات تحت الذرية. ويقوم المحامون بدراسة قوانين نيوتن ليتمكنوا من تحليل حوادث السيارات. وعلى الرغم من أننا سنرى أن النسبية وميكانيكا الكم ستتطلب

بعض التعديلات وتوسيع قوانين نيوتن، فإنها دائمًا ما تبدي دقة في وصف الحركة في العالم الفيزيائي.

ومن المهم التيقن من الاستخدام المتكرر والجمع الذي أجراه نيوتن بين المنطق الاستقرائي والاستدلالي. وكان دائمًا يبدأ بالملاحظة الحاسمة. وفي حالة الجاذبية، مثلًا، فإنه بدأ بتحليل كيف تسقط الأشياء، ثم بسط هذا التحليل على حركة القمر. وعندما أصبح لديه نظرية عامة — توصل إليها من ملاحظاته بواسطة المنطق الاستقرائي — بدأ في استخدامها لتفسير ظواهر أخرى والتنبؤ بها بواسطة المنطق الاستدلالي. وفي حالة الجاذبية، فقد أثبت أن قانونه للتربيع العكسي يمكن أن يفسر قوانين كبلر لحركة الكواكب. وقد وضع نيوتن مثالًا واضحًا، أخذ يتبعه تقريبًا كل العلماء، وذلك بالجمع بين المنطق الاستقرائي والاستدلالي للحصول على نظرية واختبارها.

وقبل أن نأخذ في اعتبارنا التداعيات الفلسفية والتضمينات في أعمال نيوتن، لعل من المفيد الإشارة إلى أن هذه القوانين لا تجيب على جميع الأسئلة فيما يخص الحركة والجاذبية. فمع أن نيوتن، باستخدام قانون التربيع العكسي للجاذبية، قد فسر لماذا تسقط الأجسام بحركة تسارعية منتظمة، فإنه لم يبيِّن لماذا تعتمد الجاذبية على المسافة بهذا الشكل، أو كيف تؤثر الجاذبية عبر المسافات، وقد حير العلماء على مدى عصور طويلة. وتؤثر الجاذبية فيما يبدو عبر الفراغ الخالي، فالأرض تجذب القمر (والعكس صحيح) والشمس تجذب الأرض (والعكس صحيح). ويفصل الأرض عن القمر ٢٤٠٠٠٠ ميل من فراغ خالٍ تقريبًا، بينما يفصل الشمس عن الأرض حوالي ٩٣ مليون ميل من فراغ مماثل. ومن المذهل أن هذه الأجسام تتداخل مع بعضها بشكل ما. ويحدث الشيء نفسه فيما يخص القوى المغناطيسية. ومن الأمور المسلية الغريبة اللعب بقضيبين مغناطيسيين، فمن السهل أن تشعر كيف يبدآن التأثير أحدهما على الآخر قبل أن يتلامسا معًا بالفعل. فكيف يفعلان ذلك؟ وهذه نسخة أخرى من مشكلة التداخل عن بعد.

ونحن لسنا مستعدين بعد لمناقشة حل هذه المشكلة استعدادًا تامًّا، وسوف نتناولها مرة أخرى في الفصل الذي يتحدث عن النسبية، ثم نناقشها بتفاصيل أكثر في الفصل الأخير، عندما نتناول وحدات البناء الأساسية في الطبيعة. وباختصار، يبدو أن الأجسام تتداخل، إما بالجاذبية أو بالقوى الكهرومغناطيسية أو أي قوى أخرى، وذلك بتبادل جسيمات تحت ذرية دقيقة للغاية وغير مرئية للعين البشرية.

وقد ناقش نيوتن مشكلة الفعل عن بعد، ولكن لعدم قدرته على حلها فقد اختتم بقوله: «أنا لا أضع فروضًا.»

وبإيجاز يمكن القول إن جاليليو قد بين كيف تسقط الأشياء: بواسطة حركة تسارعية منتظمة. ثم فسر نيوتن ذلك بأن الأجسام تسقط بهذا الشكل لوجود قوانين للحركة وقانون تربيع عكسي للجاذبية. ونحن نعرف الآن كيف تنتقل القوى، ولكننا ما زلنا لا نعرف لماذا تملك الأجسام قصورًا ذاتيًا، أو لماذا توجد الجاذبية أساسًا. وسنحرز تقدمًا أبعد حول هذه الأسئلة عندما نناقش النسبية، وميكانيكا الكم، والجسيمات الأولية، ولكننا سنرى أن كل إجابة عن أي سؤال يبدو أنها تثير سؤالًا جديدًا.

التداعيات والتضمينات

كان لتوليف نيوتن العظيم لقوانين الحركة والقانون العام للجاذبية لتفسير كل أنواع الحركة بصمة فلسفية ووجدانية هائلة على العلماء في عصره. فقد صورت أبحاثه العالم كساعة عظيمة تعمل بدقة متناهية. ولأنه لم يحدث التشكك في هذه الصورة إلا في العصر الحديث نسبيًا، فمن المهم أن نفهم كيف كانت هذه الصورة، وما هي بعض عواقبها الفلسفية التي تضمنتها.

بينت قوانين نيوتن أن الحركات والتداخلات بين الأجسام المادية في العالم تخضع لعدد قليل من قوانين بسيطة نسبيًا. ووفقًا لهذه القواعد، إذا عرف المرء موقع وكتلة وسرعة (السرعة المتجهة) مجموعة من الأجسام في لحظة معينة، فإنه يستطيع أن يحدد كيف تتداخل الأجسام مع بعضها، وما الذي ستكون عليه نتيجة التصادمات. فمثلًا يستخدم المرء قانون الجاذبية لتحديد محصلة القوى المفروضة على كل جسم نتيجة وجود كل الأجسام الأخرى. ثم، يستطيع المرء أن يستخدم القانون الثاني للحركة لتحديد مقدار واتجاه التسارع الناتج لذلك الجسم، مما يسمح للمرء أن يعرف سرعة الجسم المتجهة. وسيمكننا قانون الحفاظ على كمية الحركة من تحديد نتيجة أي تصادم محتمل. والآن، من الطبيعي أن يكون ذلك معقدًا تمامًا، إلا أنه غالبًا ما ينجز المهندسون والعلماء أعمالهم على مجموعات من الأجسام باستخدام تلك القوانين، وهي تعمل جيدًا!!

فحركات مجموعة من كرات البلياردو على الطاولة أو مجموعة من الجسيمات تحت الذرية في تفاعلات نووية يمكن التنبؤ بها بدقة إذا كنا نعرف في وقت واحد

أين يوجد كل جسم وما هي سرعته المتجهة. ويمكن للأطباء الشرعيين الاعتماد على ذلك لحساب وتحديد السرعات الأصلية والاتجاهات للسيارات المشتركة في الحادث إذا عرفت السرعات والاتجاهات النهائية، وذلك من علامات الكوابح، وحل الألغاز المشابهة. وتبين قوانين نيوتن أن الحركة المستقبلية لأي مجموعة من الأجسام يمكن تحديدها بمعرفة حركاتها الابتدائية.

وإذا فكر المرء في النتائج المنطقية الظاهرية لذلك، فإنها تتضمن أن الحركات المستقبلية لكل الأجسام في العالم من الممكن التنبؤ بها إذا استطعنا فقط تحديد الحالة التي هي عليها الآن. وطبعًا لن نستطيع تحديد مواقع وسرعات (متجهات السرعة) كل الأجسام في العالم في أي لحظة (ولا حتى أكبر كمبيوتر في العالم يستطيع ذلك). لكن الفلاسفة من بعد نيوتن سرعان ما تحققوا — من ناحية المبدأ — من أن النقطة الهامة هي: من الممكن إجراء ذلك. مهما كانت مواقع وسرعات (متجهات السرعة) فإنها تحدد الآن ما ستكون عليه في المستقبل. ولا يهم أننا لا نستطيع إجراء الحسابات لمستقبل الكون ككل، فإنه ما زال محددًا. وتبين قوانين نيوتن كونًا يتطور مع الزمن، وفقًا لقوانينه بطريقة محددة تمامًا مسبقًا. والكون مثل ساعة عملاقة مفصلة تعمل بطريقة تمليها القواعد.

وقد استخدم كثير من الفلاسفة أعمال نيوتن كمراجع لإثبات القدرية. فإذا كان كل شيء يتطور بطريقة يمكن التنبؤ بها (نظريًّا)، فإنه محتوم. وقد تم استلهام عالم نيوتن ليتحدى وجهة النظر حول الحتمية الذاتية للأفراد — بل وحتى الاختيار الإلهي للملوك. وقد تبدو مثل هذه النتائج صادقة. وكما سنرى فيما بعد فيما يخص التداعيات الظاهرية للنظريات الفيزيائية الأخرى، فإن مثل هذه الاستنتاجات الكبرى التي تطبق على العلم ككل، محل تساؤل. وتحديدًا، فإننا سنرى أن نتائج ميكانيكا الكم تتحدى مباشرة هذا الكون المقدر سلفًا. فضلًا عن ذلك، من الصعب التأكد من تطبيق القوانين النوعية للطبيعة التي حددناها في منطقتنا الصغيرة من العالم على بقية العالم ككل.

كانت قوانين نيوتن نصرًا عظيمًا للعلم. فقد كان الكثير من الفيزياء يبدو ظواهر منفصلة وغير مرتبطة بدون تفسيرات بسيطة. وقد قام نيوتن بتفسير كل أنواع الحركة بمدلول عدد قليل من القوانين البسيطة، وقد شجع ذلك العلماء بشدة، فقد أصبحوا واثقين أن عالمنا في الحقيقة منظومة عقلانية تحكمها قوانين بسيطة، وبدا أنه قد تكون هناك أسباب جيدة لكل شيء.

شرع العلماء في كل المجالات في اكتشاف القوانين «الأساسية» في مجالاتهم. وفي الحقيقة المجالات التي لم تكن معدودة من العلوم في السابق أصبحت كذلك، واعتُرف بها علمًا. تشكلت «العلوم الاجتماعية» وشرع المفكرون يبحثون عن القوانين التي تحكم السلوك البشري. وكانت هناك حركة ترمي إلى جعل كل مجال من مجالات البحث البشري علمًا. وقد حاول آدم سميث في كتابه «ثروة الأمم» Wealth of Nations أن يعرف قوانين الاقتصاد بحيث يمكن تبني السياسات الاقتصادية بطريقة علمية. وقد حاول أوجست كومت Anguste Comte أن يفعل الشيء نفسه في السوسيولوجيا (أو الاجتماع). وكانت الثقة في القدرة القصوى «للعقل العلمي» مهولة، فأسس ملوك أوربا الأكاديميات المكرسة لحل المشكلات البشرية. وقد أسس فريدريك الأكبر وكاترين إمبراطورة روسيا أكاديميات تحاكي تلك التي أسسها تشارلز الثاني في إنجلترا ولويس الرابع عشر في فرنسا. وكانوا يتحدثون عن العصر على أنه عصر العقل، وأن نيوتن حامل النور. ولا يمكن صياغة هذه النقطة بشكل أقوى من ذلك: فقد وحدت أعمال نيوتن مدى واسعًا ومتنوعًا جدًّا من الظواهر بواسطة تفسير جميع الحركات بعدد قليل من القوانين. فإذا كان العالم الفيزيائي بهذه البساطة، فإن التفكير يوحي بالتساؤل: لماذا ليست كل فروع المعرفة كذلك؟

وفكرة وجود قواعد بسيطة ومنطقية لكل شيء قد امتدت فيما وراء البحث العلمي والفكري المجرد. فقد كانت الثورة الفرنسية والثورة الأمريكية مكرستين لفكرة أن للناس حقوق طبيعية معينة لا بد من تقديرها. وقد شرع مصممو الحكومات الجديدة في محاولة إرساء قوانين ومبادئ حاكمة متسقة مع هذه الحقوق الطبيعية، وقد حاولوا الجدال منطقيًّا انطلاقًا من الحقوق المفترضة ليستنتجوا نوع الحكومة التي لا بد من وجودها. وقد كان «لإعلان الاستقلال» Declaration of Independence بنية بديهية مماثلة، مع دعم استدلالي منطقي للاستنتاجات النهائية، كما فعلت برينكيبيا نيوتن. وقد كتب بنيامين فرانكلين Benjamin Franklin، الذي كان أحد أعظم علماء عصره، مقالة بعنوان «عن الحرية والضرورة: الإنسان في العالم النيوتوني» On liberty and Neccessity: Man in the Newtonian Universe. وكان جيفرسون Jefferson يطلق على نفسه اسم عالم، وقد بدأ التقاليد الأمريكية في تشجيع الحكومة للعلم. وكان عصر العقل في ريعانه.

الفصل الرابع

مفهوم الطاقة

الطاقة هي التي تسيرها



جيمس جول James Joule.

على الرغم من أن قوانين نيوتن في الميكانيكا كانت في غاية النجاح في تفسير الكثير من الظواهر الطبيعية، فإن الكثير من العمليات في الطبيعة قد ظلت غير قابلة للفهم بتطبيق تلك القوانين فقط. وكانت الحرارة هي إحدى أفضل هذه الظواهر معرفة. فعلى الرغم من المحاولات العديدة المبذولة لفهم الحرارة منذ أيام أرسطو على الأقل، فإن معظم معرفتنا الحالية بالحرارة قد تطور خلال القرن التاسع عشر. والدراسات

التي أُجريت أثناء القرن التاسع عشر من أجل فهمٍ أفضل للحرارة وإنتاجها أدّت في النهاية إلى المفهوم الحديث للطاقة. وبسبب أن هذا المفهوم هو أكثرها مغزى لفهم طبيعة عالمنا الفيزيائي، وأن الطاقة قد أصبحت من الموضوعات الهامة في حياتنا، فإن الأمر يستحق أن نسترجع الخطوات الهامة في تطوير مفهوم الطاقة. فمن المهم أن نعرف ما الطاقة، كيف تتميز وكيف تقاس، وما أشكالها، وكيف يمكن تحويلها من شكل إلى آخر.

التداخل وقوانين الحفظ

كانت أولى الخطوات الحقيقية في تطوير مفهوم الطاقة هي التحقق من أن هناك قوانين للحفظ في الطبيعة. فإن كان هناك قانون للحفاظ على بعض الكميات، فستظل الكمية الكلية ثابتة القيمة طوال الوقت في نظام معزول. وقد طور نيوتن قانون الحفاظ على كمية الحركة في كتابه برينكيبيا. وكان نيوتن يعتقد أن كمية الحركة الكلية (كان يسميها حركة motion) لمنظومة — التي هي مجموع حواصل ضرب كتلة الأجسام في سرعاتها المتجهة — هي التي تظل ثابتة، حتى لو سمح للكتل المختلفة بالتصادم بعضها مع بعض. «والنظام المعزول» هو تجمع لأجسام تستطيع التداخل فيما بينها وليس مع أي شيء آخر. وبتداخل الأجسام، ولنقل بالتصادمات، فإن سرعتها المتجهة المنفردة ومن ثم كمية حركتها قد تتغير، ومع ذلك، فإن مجموع المتجهات لكمية حركاتها ستظل دائمًا لها القيمة نفسها. (فكرة قانون الحفاظ هذا لم تكن أصلية لدى نيوتن، ولكنها قد تطورت بواسطة العلماء الإنجليز: هوك، ووواليس، ورين، وقُدمت كمقترحات قانون بواسطة العالم الهولندي كريستيان هويجنز في ١٦٦٨.)

فمثلًا، يسمح قانون الحفاظ هذا بالتنبؤ بما يحدث عندما يصطدم جسم له كمية حركة معروفة (الكتلة مضروبة في السرعة المتجهة) بجسم آخر معروفة كمية حركته كذلك. ويمكن حساب كمية حركة كل منهما بعد التصادم إذا كان هناك شيء آخر معروف عن التصادم: فمثلًا، هل يلتصق الجسمان معًا أم أن التصادم مرن. وإذا أخذنا في اعتبارنا المزيد من «القوانين» مثل ذلك الذي تخضع له الطبيعة دائمًا، فإننا يمكن أن نرفع من مقدرتنا على التنبؤ بالضبط بما سيحدث في مواقف متزايدة التعقيد، لأن كل قانون للحفاظ يمكن التعبير عنه بمعادلة. ولأن المعادلات يمكن حلها رياضيًّا، فإن التنبؤ بالنتائج الدقيقة يصبح ممكنًا.

اعترف كريستيان هويجنز أيضًا بأن هناك كمية أخرى يُحافَظ عليها في تصادمات معينة بجوار كمية الحركة (كميتها الكلية تظل ثابتة). وهذه الكمية، التي أطلق لايبنتز عليها القوة الحية vis viva Living Force، كانت تحسب كناتج ضرب كتلة الجسم في مربع السرعة المتجهة mv^2. وفيما بعد أُدْخِل معامل نصف على هذه الكمية وأعيد تسميتها «طاقة الحركة» Kinetic energy. (جاء معامل النصف عندما تم استنباط هذه الكمية من قوانين نيوتن للحركة.) ويسمى نوع التصادم الذي يُحافَظ فيه على طاقة الحركة بالصدمة المرنة. والأمثلة المألوفة على المصادمات المرنة أساسًا تقدمها تصادمات كرات البلياردو.

وقد تعزز مفهوم طاقة حركة الجسم عندما اعتُرِف بأنه ناتج تطبيق قوة الجسم. فإذا قاس شخص ما كمية محصلة القوة المطبقة والمسافة التي طبقت أثناءها القوة على الجسم، فإن ما يكتسبه الجسم من طاقة الحركة سيكون هو حاصل ضرب القوة في المسافة.

ولا حاجة أن تظل القوة ثابتة، ولكنها ربما تتغير بتغير المسافة المقيسة. وستكون طاقة الحركة المكتسبة بواسطة الجسم مساوية لمتوسط القوة مضروبة في المسافة. وبذلك تكون الزيادة في طاقة الحركة هي التأثير المتكامل لقوة تسارع تؤثر على مدى مسافة ما.

وفي الحقيقة، فإن معكوس هذا العلاقة يبين لماذا كانت تعرف طاقة الحركة أولًا باسم القوة الحية فإذا كان للجسم سرعة متجهة، فإن له المقدرة على ممارسة قوة على طول مسافة، فمثلًا، إذا اصطدمت كرة كبيرة تتحرك بزنبرك فإنها يمكن أن تضغطه أكثر من «الوزن الساكن (الميت)» للكرة وحدها. وهذه المقدرة على ممارسة قوة إضافية تترافق مع حركة الجسم وتقاس بواسطة طاقة الحركة. (لاحظ أن طاقة حركة الجسم تتناقص كلما ضُغط على الزنبزك.) ولهذا كانت هذه القوة التي ترجع للحركة فقط تسمى القوة الحية.

وبالمثل فإن التغير في كمية حركة جسم ما (الكتلة مضروبة في السرعة) يمكن أن نبين أنها تأثير قوة على الجسم مضروبة في طول الفترة الزمنية المسموح لها بالتأثير. وستكون كمية الحركة المضافة للجسم مساوية لمتوسط القوة مضروبًا في الزمن الكلي.

وترتبط كلٌّ من طاقة الحركة وكمية الحركة بالسرعة المتجهة للجسم. وطاقة الحركة كمية عددية، بينما كمية الحركة كمية متجهة (الفصل ٣). وتتحدد الكميتان

بواسطة تأثير متكامل (تراكمي) لفعل محصلة قوى. ومع ذلك، فطاقة الحركة هي التأثير المتكامل لمحصلة قوى تؤثر على طول مسافة، مقارنة بكمية الحركة، التي هي التأثير المتكامل لمحصلة قوى تؤثر في فترة زمنية.

وحاصل ضرب القوة في المسافة مفهوم أكثر عمومية مما هو مبين حتى الآن، وهو كمية هامة تسمى الشغل Work. ومع ذلك، لا بد من الحرص الشديد أثناء استخدام كلمة «شغل»؛ لأنها تعني شيئًا دقيقًا جدًّا. يقول الفيزيائي إنك إذا دفعت بشدة عربة محملة بالطوب ولم تتحرك العربة، فإنك لم تبذل شغلًا على العربة! فقط إذا تحركت العربة نتيجة للقوة الواقعة عليها يكون المرء قد بذل شغلًا عليها. ويمكن مضاعفة كمية الشغل المبذول وذلك إما بمضاعفة القوة الواقعة أو مضاعفة المسافة التي تم عبرها إيقاع القوة. وفي أي من الحالتين، سيكون الناتج هو نفسه — وسيكون ضعف كمية طاقة الحركة للجسم.

ستكون طاقة الحركة هي أول مثال لدينا لإحدى الصور التي يمكن أن تتخذها الطاقة. ومتى بذلنا شغلًا (في مفهوم الفيزيائيين) على جسم ما، فإننا نغير من طاقة الجسم. ومع ذلك، من الممكن بذل شغل على جسم ما دون تغيير في طاقة حركته، فمثلًا قد تكون القوة المبذولة عبر المسافة تحرك جسمًا ضد الجاذبية ببطء إلى أعلى فوق مستوى مائل. وعند إزالة القوة، يترك الجسم في الأعلى على حافة السطح دون حركة. فإذا بذل شغل على الجسم، فما هو نوع الطاقة التي منحت له؟ الإجابة هي طاقة الوضع potential energy لأن الجسم، في موقعه الأعلى، يملك الآن القدرة على اكتساب طاقة حركة. فإذا دفع الجسم دفعة خفيفة من حافة المستوى لجعله يسقط، فإنه سيتسارع وسيكتسب طاقة حركة مع سقوطه. وطاقة الوضع هي الطاقة المصاحبة للجسم بسبب وضعه أو ترتيب أجزائه، كما سنناقش ذلك فيما بعد. (وقد كانت في الأصل تسمى «القوة الحية الكامنة»، والكامنة على اعتبار أنها كانت تملك القدرة على التحول إلى القوة الحية.)

ويجعل مفهوم طاقة الوضع من الممكن إيجاد مبدأ حفظ آخر يتضمن الحركة. فهناك منظومات معينة شائعة لا تتضمن تصادمات، لكن مع ذلك تتضمن حركة، بها سمة معنية لا تتغير. شيء ما يتم الحفاظ عليه، كما يُفضل أن يقول الفيزيائيون. وإحدى هذه المنظومات هو البندول. فإذا كان البندول مصممًا بشكل مناسب، فإنه سيظل يتأرجح فترة طويلة من الزمن، وإذا راقبنا مثل هذا البندول فترة قصيرة يمكننا تصوره على أنه لن يتوقف أبدًا. وبدقة أكثر، يمكننا قياس الارتفاع الذي يصل

إليه ثقل البندول في كل أرجحة، وسنرى أنه في كل مرة يعود تقريبًا إلى الارتفاع نفسه. ولن يكون من الصعب إدراك أنه لو أننا تخلصنا من تأثير مقاومة الهواء ووضعنا شحمًا جيدًا على محور البندول ليجعل الحركة زلقة، فإن ثقل البندول سيعود في كل مرة إلى الارتفاع نفسه بالضبط في كل أرجحة. وهذه مشاهدة مثيرة. فما الذي يجعل الطبيعة تفعل ما تفعله بالنسبة للبندول؟

فهل هناك شيء ما يُحافَظ عليه في حركة البندول التي تتطلب أن يكون السلوك بهذا الشكل؟ وإذا كان الأمر كذلك، فما الذي يُحافَظ عليه؟ إنه ليس طاقة الحركة؛ لأن ثقل البندول يسرع ويبطئ، بل حتى إنه يتوقف في لحظة وهو في قمة كل أرجحة. وعندما يمر الثقل بالوضع في القاع، فإنه يتحرك بسرعة. ولذا، ولأن طاقة الحركة هي نصف الكتلة مضروبًا في مربع السرعة $(1/2)mv^2$، فإنها تساوي صفرًا في النقاط العليا للأرجحة، وتكسب قيمة قصوى في النقاط السفلى.

ويبين التحليل الرياضي أن الكمية التي يُحافَظ عليها هي مجموع طاقة الحركة وطاقة الوضع لثقل البندول. ويقال إن طاقة الوضع تساوي صفرًا عندما يكون الثقل في أسفل نقطة، وتزداد مباشرة مع الارتفاع فوق ذلك الوضع. وتصل إلى نهايتها العظمى عندما يكون الثقل في أعلى نقطة أثناء الأرجحة حيث تكون طاقة الحركة صفرًا. ويعمل ذلك بشكل صحيح. والطاقة الميكانيكية (مجموع هذين النوعين من الطاقة) تكون دائمًا هي نفسها. والبندول مثال على منظومة محافظة.

ومثال آخر على منظومة محافظة، هو كرة تتدحرج إلى أعلى وإلى أسفل على جانبي وادٍ. فإذا كانت الأرض ملساء جدًّا، وبدأنا بالكرة من ارتفاع معين أعلى تل أحد جانبي الوادي، فعندما نحرر الكرة ستتدحرج إلى أسفل الوادي وإلى أعلى التل في الجانب الآخر، لأنها تمتلك المجموع نفسه من طاقة الوضع وطاقة الحركة مثل البندول. وسيكون المجموع، أي الطاقة الميكانيكية الكلية، هو نفسه ثابتًا.

ويمكن معرفة السبب في تسمية هذا الشكل الجديد من الطاقة بطاقة الوضع. فعندما تكون الكرة عالية على أحد التلال، فإنها تملك مقدرة كبيرة لاكتساب طاقة حركة. وكلما ارتفعت الكرة أعلى التل أكثر، فإنها ستكون أسرع في حركتها، وبذلك سيكون لها طاقة حركة أكبر عندما تصل إلى الوادي. ولنلاحظ أن طاقة الوضع هي في الواقع طاقة وضع جاذبية. ويبذل الشغل هنا ضد قوى الجاذبية لرفع الكرة إلى أعلى، بينما ستقوم قوى الجاذبية بتسريع الكرة أثناء هبوطها عائدة إلى الوادي.

ومثال آخر يتضمن أيضًا الحركة فقط وقوى الجاذبية، هو منظومة الكواكب التي تتحرك حول الشمس، وهي منظومة محافظة. ينص قانون كبلر الأول حول حركة الكواكب (فصل ٢) على أن مدار الكواكب قطع ناقص (بيضاوي)، والشمس في إحدى بؤرتيه. وهكذا يكون الكوكب أحيانًا أقرب ثم أحيانًا أبعد عن الشمس، إنه يملك طاقة وضع جاذبة أكثر (عملية السقوط من مسافة أبعد، ولذا فهو «أعلى»). وينص قانون كبلر الثاني على أن نصف قطر المتجه من الشمس إلى الكوكب يغطي مساحات متساوية في فترات زمنية متساوية. وهذا القانون هو الذي وراء حقيقة أن الكوكب يتحرك أسرع عندما يكون أقرب إلى الشمس. ومرة أخرى يستطيع المرء رؤية الأمور تجرى بالطريقة الصيحة. فالكوكب يتحرك أسرع عندما يكون أقرب إلى الشمس، بحيث يكون للكوكب طاقة حركة أكبر عندما تكون طاقة الوضع أقل. ويبين التحليل الرياضي مرة أخرى أن مجموع طاقتي الوضع والحركة سيظل ثابتًا تمامًا. (ويصور قانون كبلر الثاني مبدأ آخر للحفاظ، الحفاظ على كمية الحركة الزاوية، التي نناقشها في الفصل ٨.)

وفي كل هذه الأمثلة تمت مناقشة الحركة بمدلول السرعة المتجهة والوضع. ولم تكن هناك ضرورة لمناقشة التسارع (العجلة) أو قانون نيوتن للحركة مطبقًا على تلك الحالات. ويسمح مبدأ الحفاظ على الطاقة الميكانيكية الكلية لنا بتحليل الحركة ببساطة. وهذا أحد الأسباب الرئيسية لاستخدام مبدأ الحفاظ: إنه أسهل. وبالطبع جاء البرهان على المبدأ من قوانين نيوتن للحركة، لكنها على أي حال مجرد افتراضات، حتى على الرغم من أنها قائمة على المشاهدة. ويستطيع المرء بنفس الطريقة أن يبدأ الحفاظ كافتراض أساسي، وبذلك يجعل الفيزياء «أبسط».

ويبدو أن المنظومات المحافظة تعمل في عالمنا. وتبدو هذه المنظومات دائمًا محتفظة بالقيمة نفسها للطاقة الكلية عندما نأخذها كمجموع لطاقة الحركة وطاقة الوضع. إلا أن هذه المنظومات في الواقع تقريبًا محافظة. فالبندول سيتوقف ولكن ببطء، وكذلك ستفعل الكرة في الوادي. ويبدو أن الطاقة الكلية تتجه ببطء نحو الصفر. فالكواكب تتحرك ببطء إلى الخارج إلى مدارات أكبر. فهل يوجد هناك قانون دقيق للحفاظ يخص هذه المنظومات أم لا؟

والإجابة عن السؤال السابق هي أن الطاقة الكلية يتم الحفاظ عليها فعلًا، إلا أن هناك نوعًا ثالثًا من الطاقة، وتتحول طاقة الحركة وطاقة الوضع ببطء إلى هذا الشكل الثالث. والشكل الجديد الذي نتناوله من الطاقة هو الحرارة heat. وتواجه

المنظومات قوى احتكاك (بين ثقل البندول والهواء وفي المحور — الذي يتأرجح عليه — بالنسبة للمثال الأول)، والاحتكاك يولد الحرارة (كما يحك الناس أيديهم ببعضها لتدفئتها). وتفقد الحرارة المتكونة بهذا الشكل بالتدريج من المنظومة، فهي تهرب إلى الهواء المحيط وتدفئه قليلًا جدًا. وكون كل الطاقة المفقودة تظهر على شكل حرارة، وأن الحرارة شكل آخر للطاقة، قد تم إرساؤه بواسطة الفيزيائيين في القرن التاسع عشر. ويستحق الأمر مناقشته الآن ببعض التفاصيل، وهو تطور فهمنا للحرارة كشكل من أشكال الطاقة. وفي الحقيقة، تاريخيًا أخذ الفيزيائيون في اعتبارهم وجود قانون للحفاظ على الطاقة الكلية فقط بعد أن ثبت أن الحرارة صورة من صور الطاقة.

الحرارة والحركة

جرت دراسة الحرارة منذ الأزمنة البعيدة. وكان أرسطو يعتبر أن النار أحد العناصر الخمسة الأساسية في العالم. وبعد ذلك كانت الحرارة تؤخذ على أنها شيء ما يسري من الأجسام الساخنة إلى الأجسام الأبرد، وأصبحت تعرف بأنها نوع من الموائع. وفي زمن جاليليو تقريبًا، كان هذا المائع يعرف باسم فلوجستون phlogiston وكان يعتبر روح المادة. وساد الاعتقاد بأن للفلوجستون كتلة ويمكن طرده أو امتصاصه بواسطة الجسم عندما يشتعل.

وفي أواخر القرن الثامن عشر، نُقحت فكرة أن الحرارة مائع بواسطة الكيميائي الفرنسي أنطوان لافوازييه Antoine lavoisier وأصبحت تعرف باسم النظرية السعرية للحرارة caloric theory. وقد تقبل معظم العلماء هذه النظريات على أنها النظرية الصحيحة للحرارة مع حلول بداية القرن التاسع عشر. وكان مائع الحرارة يسمى المائع السعري، وكان من المفترض أنه بلا كتلة ولا لون، ويتم الحفاظ على كميته الكلية في الكون. (طور لافوازييه هذه النظرية بينما كان يثبت أن الكتلة يتم الحفاظ عليها في التفاعلات الكيميائية المعروفة مثل الأكسدة، أو الاشتعال.) ولا يمكن في الحقيقة عزل المائع السعري، بصفاته المميزة، من الأجسام لرؤيته أو دراسته. وهكذا كانت نظرية المائع السعري تمثل تجريدًا متناميًا في تفسير ظواهر الحرارة. وكانت عدة ظواهر قد فهمت بدقة بمدلول النظرية السعرية، على الرغم من أنها نفسها لم تكن صحيحة.

وهناك مثال على عملية كان يُظن أنها مفهومة بتحليلها بواسطة النظرية السعرية للحرارة، هي عملية الآلة البخارية. وهو مثال جيد لأنه حسّن من فهم طبيعة الحرارة، وذلك بمحاولات تحسين الآلات البخارية؛ ولأنه أدخل عددًا هامًّا من المفاهيم المطلوبة لدراسة الحرارة. وقد تم تصميم أول آلة بخارية تعمل حوالي ١٧١٢ بواسطة توماس نيوكومن Thomas Newcomen الحداد الإنجليزي. وسرعان ما دخلت آلة نيوكومن كمصدر للقوة لمضخة مائية في مناجم الفحم عبر إنجلترا. وقد حلت محل المضخة المكلفة المزعجة التي تدار بالأحصنة.

ويبين شكل ٤-١ آلة بخارية من طراز نيوكومن مبسطة. تقوم النار من تحت الغلاية بتوليد البخار باستمرار من الماء الموجود في الغلاية. وتكتمل عملية الآلة البخارية أساسًا في أربع خطوات تجري باستخدام الصمامين المكتوب عليهما صمام البخار steam valve وصمام الماء water valve: (١) افتح صمام البخار ليدخل البخار إلى غرفة المكبس، ويتسبب ضغط البخار في رفع المكبس وخفض ذراع المضخة. (٢) أغلق صمام البخار. (٣) افتح صمام الماء، الذي يسمح للماء البارد أن يدخل على شكل رذاذ إلى الغرفة فيكثف البخار ويكون فراغًا جزئيًّا، وبذلك «يمتص» المكبس إلى أسفل مما يرفع ذراع المضخة. (٤) أغلق صمام الماء. وتتكرر الدورة كلها. وفي النماذج الأولى للآلات البخارية، كانت الصمامات تفتح وتغلق يدويًّا بالفعل. ومؤخرًا تم التحقق من أن الآلة نفسها يمكن أن تفتح وتغلق الصمامات «أوتوماتيكيًّا» باستخدام التروس والروافع.

كانت الأفكار المبكرة فيما يتعلق بالأساسيات في الآلة البخارية غير متقنة بالمرة بمقاييس اليوم. وعلى الرغم من أنها كانت تدعى آلة بخارية، إلا أن الوقود الذي كان يحترق تحت الغلاية هو الذي كان بالفعل يمد الآلة بالقوة. ولم يكن التجريبيون الأوائل مقتنعين تمامًا بذلك، وكان مصدر القدرة للآلة البخارية يعتبر هو البخار، وكانت كفاءة الآلة تقاس بكمية البخار الذي تستهلكه. وقد حسنت الكثير من هذه الأفكار المبكرة الآلة البخارية بشكل ملموس، وبالذات التحسينات التي أدخلها المخترع الاسكتلندي جيمس وات James Watt، الذي قدم في الحقيقة أول آلة بخارية ذات كفاءة في سنة ١٧٦٩.

كانت جدران الأسطوانة في آلة نيوكومن تبرد أثناء التكثيف أو في خطوة الضربة السفلية من الدورة. وعندما يسمح للبخار بالدخول إلى الأسطوانة من أجل التمديد أو الضربة العليا من الدورة، فإن ثلثي البخار يستخدم في مجرد إعادة تسخين جدران

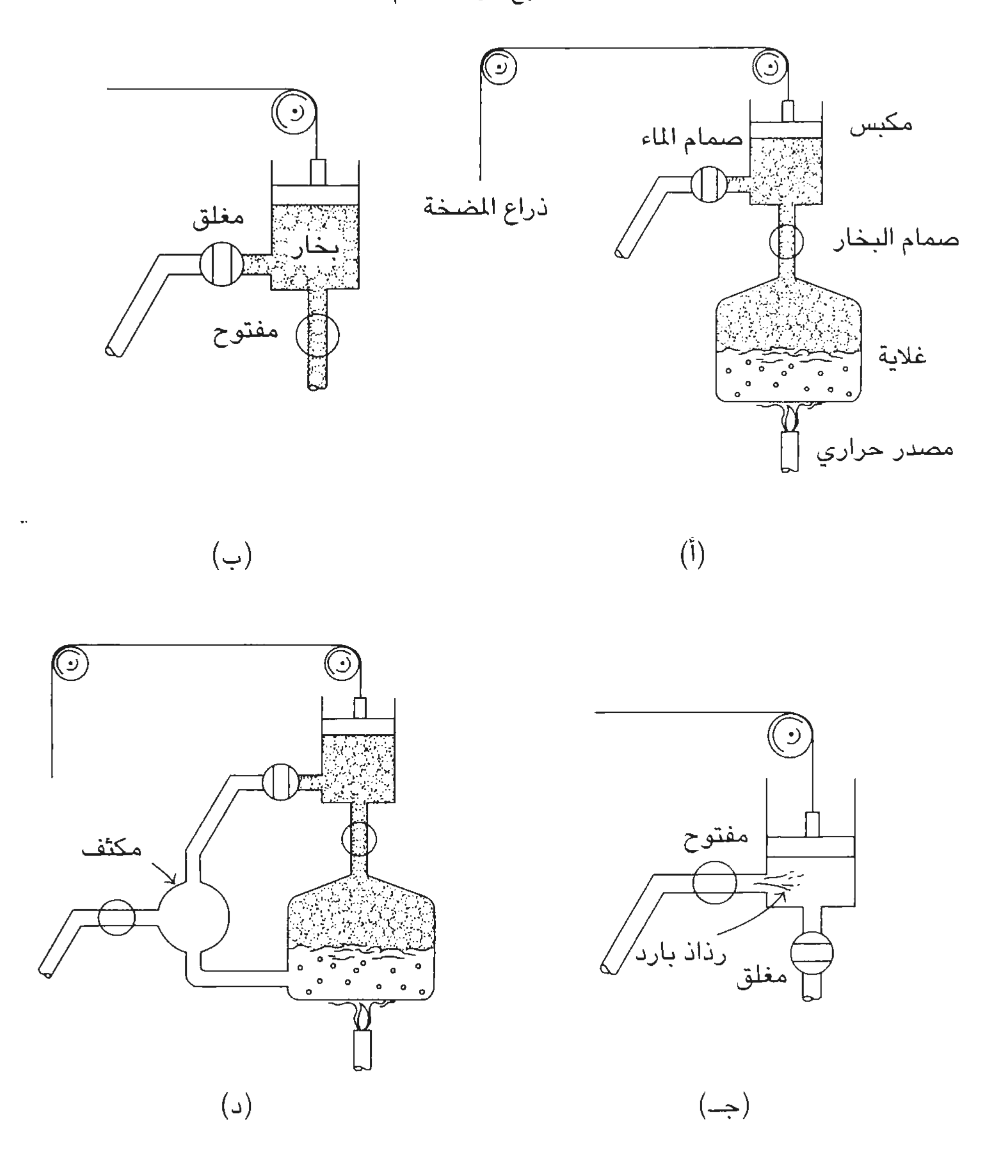
الأسطوانة ليتمكن الباقي من البخار من ممارسة ضغط كاف ليتحرك المكبس إلى أعلى. تيقن وات أن خطوة التكثيف كانت ضرورية للعملية الدورية (الحلقية) في الآلة، لكنه أيقن كذلك أن التبريد الفعلي للبخار من الممكن أن يحدث في موقع غير الأسطوانة الساخنة. ولذلك أدخل في آلته غرفة منفصلة تسمى المكثف؛ للقيام بالتبريد في خطوة التكثيف، كما هو مبين في شكل ٤-١(د). يوضع المكثف بين صمام الماء وغرفة المكبس، وبين الخطوتين (٢) و(٣) السابقتين، وكان البخار يمتص في المكثف بواسطة مضخة (ليست مبينة على الرسم) وتم تعديل الخطوة ٣ بشكل ملائم. كذلك كان الماء من المكثف يعاد إلى الغلاية.

اعترف وات كذلك بأن خطوة التكثيف الضرورية تؤدي إلى فقد بعض البخار الذي كان يمكنه دفع المكبس مسافة أبعد. ولإنقاص كمية البخار النسبية المفقودة في خطوة التكثيف، قرر أن يستخدم ضغطًا أعلى (وبذلك درجة حرارة أعلى) للبخار في المراحل الأولى من خطوة التكثيف. وهكذا وحتى بعد إغلاق صمام إدخال البخار، فإن البخار في الأسطوانة سيظل تحت ضغط مرتفع كاف لاستمرار التمدد ودفع المكبس إلى أعلى. وأثناء استمرار التمدد، سينخفض ضغطه، وقد «يبرد» لكنه سيظل يبذل شغلًا. ولا تبدأ خطوة التكثيف إلا بعد أن يكون قد بذل هذا الشغل الإضافي.

وبهذه التحسينات وغيرها أصبحت آلة وات البخارية على درجة عالية من الكفاءة، حتى إنه كان يهبها ولا يبيعها مباشرة. وكان على مستخدمي الآلة أن يدفعوا لوات، وكان المال يدخر للإنفاق على الوقود للسنوات الثلاث الأولى من عمل الآلة. اغتنى وات وزميله ماثيو بولتون Mathew Bolton وحصلوا على ثروة كبيرة، وحصلت الثورة الصناعية في إنجلترا على دفعة مهولة من مصدر جديد للقدرة الرخيصة.

كانت الخطوة الكبرى في فهم المبادئ العلمية الأساسية الكامنة في عمليات الآلة البخارية قد اتخذها مهندس عسكري فرنسي شاب اسمه سادي كارنوت Sadi carnot. ونشر سنة ١٨٢٤ كتابًا مختصرًا بعنوان: «القوة الدافعة للنار» on the Motive Power of Fire، الذي قدم فيه تحليلًا نظريًّا ثاقبًا لتوليد الحركة باستخدام الحرارة. وكان كارنوت سابقًا على عصره بكثير، ولذلك ظلت مساهمته غير ملحوظة مدة خمسة وعشرين عامًا.

أيقن كارنوت، أثناء دراسته لأعمال وات، أن المصدر الحقيقي لقدرة الآلة البخارية هو الحرارة التي تؤخذ من الوقود، وأن الآلة البخارية كانت ببساطة وسيلة فعالة



شكل ٤-١: تمثيل تخطيطي للآلات البخارية المبكرة. (أ) آلة نيوكومن. (ب) ضغط البخار يدفع المكبس إلى أعلى. (جـ) البخار المتكثف يدفع المكبس إلى أسفل. (د) آلة وات البخارية المحسنة ذات غرفة التكثيف المستقلة.

جدًّا لاستخدام الحرارة لتوليد الحركة. ولذلك فقد قرر أن يقوم بتحليل الطريقة الأساسية التي يمكن بواسطتها أن تولد الحرارة الحركة، معتقدًا أنه بمجرد فهم ذلك سيكون من الممكن تصميم آلات أكثر كفاءة من تلك التي طورها وات. وقد استغل النظرية المقبولة حينئذ، النظرية السعرية للحرارة، وتوصل إلى بعض الاستنتاجات



جيمس وات James Watt.

المذهلة على الرغم من النظرية الخاطئة. ومع مرور الزمن، وبعد نشر كتابه، أيقن أن النظرية السعرية قد تكون على خطأ، لكنه توفي متأثرًا بالكوليرا قبل أن يتتبع الموضوع كثيرًا. ومع ذلك فقد فسر كارنوت إنجاز الآلة البخارية بمقارنة مفيدة للغاية لفهم القوة الدافعة للحرارة.

ووفقًا للنظرية السعرية، فإن الحرارة مائع يسري من الأجسام الساخنة إلى الأجسام الأبرد. وكانت الآلة البخارية تعتبر المكافئ الحراري للعجلة المائية (الساقية). وتستمد العجلة المائية قدرته من سريان الماء من مستوى أعلى إلى أسفل. ودرجات حرارة الأجسام يمكن اعتبارها مشابهات لمستويات دخول التيار والتيار الخارج في العجلة المائية. ومن المعروف عمومًا أنه بالنسبة لكمية ثابتة من الماء تسري فوق العجلة المائية، كلما كان الدولاب كبيرًا، أمكن عمل شغل أكثر (وبعبارة أخرى، يسقط الماء على مسافة أبعد.) وبذلك، اقترح كارنوت أن الآلة البخارية (قال إنه من الأنسب أكثر تسميتها الآلة الحرارية) يمكنها القيام بشغل أكثر بالكمية نفسها من الحرارة (المائع السعري) إذا جعلنا الحرارة تسري بين فرق أكبر في درجات الحرارة.

ولا بد أن يكون الإنسان ماهرًا ليستوعب هذا الاقتراح. وفرق درجات الحرارة في الآلة هو الذي بين درجة حرارة البخار ودرجة حرارة الوسط المحيط. والبخار

موجود في نقطة غليان الماء. ويبدو في البداية أننا لن نستطيع أن نتحكم في درجة الحرارة العليا أو السفلى. إلا أن كارنوت قد أشار إلى أنه عند إنتاج البخار تحت ضغط أعلى، تصبح درجة حرارة البخار أعلى من درجة غليان الماء العادية (أساس كفاءة الطهي في حلة الضغط). لذلك فإن الضغط الأعلى يعني الحصول على درجة حرارة أعلى في الواقع، وفرق أكبر في درجتي الحرارة، وهكذا فسر كارنوت تحسين وات الذي وجده بزيادة الضغط. وتعمل جميع الآلات البخارية الحديثة تحت ضغط عال ومن ثم محققة ارتفاعًا في كفاءتها.

بدا إذن أن النظرية السعرية تفسر الآلة البخارية بطريقة جيدة جدًّا. وقد ظهر أن بعض السمات الأخرى لسريان الحرارة كذلك يمكن تفسيرها بالنظرية السعرية. وفيما بعد، سنحتاج إلى بعض المفاهيم والتعريفات مرة أخرى التي يمكن إدخالها هنا بمدلول النظرية السعرية.

ومن أوائل الأشياء التي لوحظت حول سريان الحرارة أنها تسري دائمًا من الأسخن إلى الأبرد. وعندما يتلامس جسمان لهما درجتا حرارة مختلفتان، يصبح الأبرد أدفأ، ويصبح الأدفأ أبرد. ولم يلاحظ أبدًا أن الجسم الأدفأ أصبح أكثر دفئًا والجسم الأبرد أكثر برودة. وتفسر النظرية السعرية هذه الحقيقة التي لُوحظت حول سريان الحرارة من الأسخن إلى الأبرد، وذلك بالقول ببساطة إن فرق درجة الحرارة يتسبب في سريان الحرارة، فالحرارة تنتقل «من الأعلى إلى الأقل حرارة». وبمدلول التشابه مع العجلة المائية، فإن ذلك بالضبط هو نفسه القول بأن الماء يسري دائمًا إلى أسفل التل.

وهناك خاصية أخرى من خواص الحرارة هي أن كمية معينة من الحرارة تلزم لرفع درجة حرارة جسم ما عددًا معينًا من الدرجات. فمثلًا تسخين جسم كبير أصعب كثيرًا من جسم أصغر، أي أنه يحتاج حرارة أكثر لعمل ذلك. وبمدلول النظرية السعرية، تقابل درجة الحرارة «ارتفاع» المائع السعري في الجسم. وكمية الحرارة المطلوبة لرفع درجة حرارة جسم درجة واحدة سلزية تسمى السعة الحرارية للجسم. وليس الحجم وحده هو الذي يحدد السعة الحرارية للجسم؛ فالأجسام المصنوعة من مواد مختلفة لكن لها كتلة واحدة قد تتطلب كميات مختلفة من الحرارة لتسخن. وقد أطلق على هذه الخاصية للمواد اسم الحرارة النوعية specific heat، وتتحدد قيمتها العددية بكمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة جرام واحد من المادة درجة واحدة سلزية.

وقد أُخْتِير الماء كمادة عيارية تُقارَن بها المواد الأخرى، وعرفت حرارته النوعية بأنها الوحدة. وتسمى كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة جرام واحد من الماء درجة واحدة سلزية، تسمى سعرًا calorie («وحدة» واحدة من المائع السعري). وكان الفيزيائيون في القرن الثامن عشر يعتقدون أن المواد التي لها حرارات نوعية مختلفة تمتلك مقدرات مختلفة على الاحتفاظ (استيعاب) المائع السعري. وتحسب السعة الحرارية لجسم ما بضرب كتلته في حرارته النوعية.

وهناك خاصية أخرى من خواص المواد يمكن تفسيرها في إطار النظرية السعرية، وتسمى الحرارة الكامنة latant heat، ويقدم لنا الماء مثالًا جيدًا لهذا المفهوم. بإضافة الحرارة إلى الماء ترتفع درجة حرارته نسبيًّا بسرعة إلى أن يصل إلى نقطة غليانه. فإذا وضعنا ترمومترًا في الماء، فسنرى أن درجة الحرارة ترتفع بسرعة حتى تصل إلى نقطة الغليان (212°F، 100°c) ثم تظل هناك عندما يبدأ (الغليان) البخر. بإضافة الحرارة باستمرار عند نقطة الغليان يتحول الماء إلى بخار. ولأن درجة الحرارة لا ترتفع، فمن الجائز أن نسأل: أين تذهب الحرارة التي أضيفت إلى الماء؟ كان أنصار النظرية السعرية يجيبون بأنها تذهب في صورة خفية أو كامنة في الماء. ولم يقترحوا أنها تختفي.

وليس هناك شك أن بعض الحرارة يُضاف أثناء ذلك الوقت. إنها ببساطة تذهب في شكل صورة غير مرئية ويمكن استرجاعها تمامًا بتبريد الماء. وتسمى هذا الحرارة الخفية بالحرارة الكامنة للبخر. وقد لوحظت ظاهرة موازية عند تسخين الجليد لينصهر. ويتطلب الأمر حرارة إضافية بعد أن يصل الجليد إلى درجة انصهاره، وذلك لصهره بالفعل. وتسمى هذه الحرارة الخفية بالحرارة الكامنة للانصهار. وقد لُوحظت هذه الحرارات الكامنة لكل المواد كلما تغيرت حالتها من جامد إلى سائل أو من سائل إلى غاز، وهي مختلفة للمواد المختلفة. وتعرف الحرارات الكامنة بأنها كمية الحرارة اللازمة لصهر أو لبخر جرام واحد من المادة.

وكانت كل كمية الحرارة الموجودة في الحرارة الكامنة تنطلق عندما تبرد المادة فيما بعد. «فمثلًا» الماء على شكل بخار حارق أكثر من نفس الكمية من الماء الساخن عند نفس درجة الحرارة. وستمرر الحرارة الكامنة للبخر عندما يتكثف على الجلد. ويبدو أن هناك شيئًا ما يتم الحفاظ عليه — أي أنه لا يدمر. وكان المعتقد أن الكمية موضع الحفاظ هي المائع السعري.

ومع ذلك، كانت هناك ظواهر أخرى لم تكن قد فسرت تمامًا بواسطة النظرية السعرية، وبعض هذه «الظواهر المشكلات» أدت بعدد قليل من الفيزيائيين إلى إنجاز دراسة وفحصٍ توصل في النهاية إلى استعراض عدم وجود المائع الحراري بالمرة. وربما أفضل هذه الظواهر المشكلات معرفة الحرارة المتولدة بواسطة الاحتكاك، فنحن نستطيع تدفئة أيدينا بمجرد حكها بعضها ببعض. في حين لا يوجد مصدر للحرارة ليدفئنا، فلا توجد نار أو حتى أي جسم دافئ ليمدنا بالحرارة في أيدينا الباردة. فمن أين أتت تلك الحرارة؟ فإذا كانت الحرارة تتولد بشكل ما، فلا بد أننا ننتج المائع السعري (تبعًا للنظرية السعرية). إلا أن المائع السعري كان من المعتقد أنه شيء ما لا يمكن خلقه أو تدميره، وهو يسري فقط من جسم إلى آخر. من أين يأتي إذن المائع السعري عندما يحدث الاحتكاك؟

كانت إجابة أنصار النظرية السعرية أن الحرارة الكامنة تتحرر عندما تنتج الحرارة عن الاحتكاك. وكان ادعاؤهم يقول إن الأمر يتضمن تغيرًا في الحالة، تمامًا كما يتحول السائل إلى غاز، عندما تنسحق جسيمات صغيرة للجسم بالاحتكاك — أثناء صناعة الماكينات (الخراطة) مثلًا. وكان بعض أنصار النظرية السعرية يقولون إن المادة «تتحطم» وأنها «تدمي» حرارة، وهي الإجابات التي لم تكن شافية كلية أبدًا. وأي قطع صغيرة تزال وتسحق بواسطة الاحتكاك يبدو أنها فقط كميات ضئيلة من المادة الأصلية. وقد تبين نهاية الأمر أن مثل هذا المسحوق له الخواص نفسها مثل المواد الأصلية، بما في ذلك الحرارة النوعية، وأنها لم يحدث لها تغير في الحالة.

كان أحد أوائل الناس الذين تأثروا بهذه الصعوبة في النظرية السعرية هو الكونت رمفورد* Count Rumford. وفي تجربة شهيرة أجريت سنة ١٧٩٨، قام رمفورد بقياس كمية الحرارة الناتجة عن الاحتكاك أثناء ثقب مدفع في مصانع السلاح الملكية البافارية في ميونيخ. وقد تأثر كثيرًا بكمية الحرارة الهائلة الناتجة وكمية شرائح وشظايا الفلز القليلة الناتجة. وكان مقتنعًا أن الكمية الهائلة من الحرارة لا يمكن أن يكون مصدرها بعض الحرارة الكامنة. وقد قام بقياس الحرارة النوعية لشظايا وشرائح الفلز ووجد أنها نفسها الموجودة في الفلز الأصلي. شرع

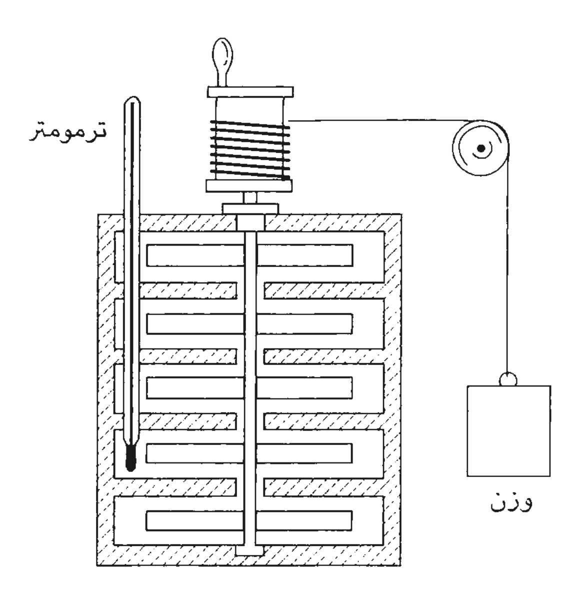
*اسمه الأصلي بنيامين طومسون (Benjamin Thompson)، كان مستعمرًا أمريكيًّا في السابق، وسياسيا محافظًا انتقل إلى لندن أثناء الثورة الأمريكية. ومن مفارقات القدر أن رمفورد، الذي ساعد في الثورة على النظرية السعرية قد تزوج من أرملة لافوازييه، الذي اقترحها أول الأمر.

رمفور في استعراض أن المرء في الحقيقة، يمكن أن ينتج أي كمية من الحرارة يرغب فيها دون أن ينقص بأي شكل من كمية الفلز. كان الفلز يتحول ببطء إلى شظايا وشرائح دون تغير في حالته. وقد شرع في إثبات أن الحرارة يمكن أن تتولد دون إنتاج أي شظايا أو شرائح بالمرة. وقد تساءل رمفورد بجدية حول ما إذا كان تفسير أنصار النظرية السعرية صحيحًا، واقترح أن الحرارة التي تنتج حرارة جديدة.

وفي الواقع تقبل أنصار النظرية السعرية نتائج تجارب رمفورد وشعروا بأنها تقدم حلولًا للألغاز حول طبيعة المائع السعري. وقد قالوا إن هذه التجارب قد بينت أن المائع السعري لا بد أن يكون مكونًا من جسيمات صغيرة وتقريبًا بلا كتلة، أعدادها في الجسم أكبر كثيرًا من العدد الذي يتحور بالاحتكاك. وهذا التفسير قريب جدًّا من مفهومنا الحديث عن الكهرباء بمدلول الإلكترونات الذرية. وبطرق عديدة، اتخذت تجارب رمفورد ببساطة لمزيد من فهم المائع السعري.

وبجانب الاحتكاك، كان هناك فئة ثانية من الظواهر التي تسبب صعوبات للنظرية السعرية، وهي التمدد والانكماش في الغازات. وفي تجربة غير معروفة إلا للقليل سنة ١٨٠٧، قام الفيزيائي الفرنسي جوزيف لويس جاي لوساك Joseph Louis Gay-lussac بقياس درجة حرارة غاز سمح له بالتمدد في غرفة مخلخلة (مفرغة من الهواء). قاس درجة الحرارة في الغاز الأصلي وفي الغرفة التي كانت مفرغة الهواء، وجد أن درجة الحرارة هي نفسها وتساوي درجة الحرارة الأصلية للغاز. وتنبأ النظرية السعرية بأن نصف المائع السعري لا بد أن يوجد في كل غرفة (إذا كانت الغرفتان متساويتين في الحجم). ولأن درجة الحرارة كان من المعتقد أنها تتحدد بتركيز المائع السعري، فإن ذلك كان لا بد أن يؤدي إلى درجة حرارة أقل بوضوح مما كانت في الأصل. وببساطة لم تكن هذه التجربة ولا تجارب مثيلة لها أمرًا مفهومًا بواسطة أنصار النظرية السعرية، وفي الحقيقة لم تكن مفهومة بواسطة أحد مدة ثلاثين عامًا.

جاءت الضربة النهائية للنظرية السعرية بواسطة التجارب الدءوبة والدقيقة للفيزيائي البريطاني جميس جول James Joule في ١٨٤٠. كان معروفًا جيدًا أن الحرارة تؤدي شغلًا، وكان ذلك مفهومًا من قبل أنصار النظرية السعرية بالتشبيه بالعجلة المائية. كانت الحرارة تقوم بالشغل بسريانها من الأعلى إلى الأقل حرارة تمامًا مثل الماء عندما يسري أسفل التل. لكن هل يستطيع الشغل أن يولد حرارة؟ كان ذلك أحد أهم الأسئلة التي أثيرت خلال كل عملية التطور لفهمنا الحالي للحرارة



شكل ٤-٢: مخضة جول، الجهاز المستخدم لتحديد المكافئ الميكانيكي للحرارة.

والطاقة. كانت إجابة أنصار النظرية السعرية بالقطع لا. فقد كان ذلك يعني تخلق مائع سعري جديد. وذلك بمثابة تخليق الماء بواسطة وسيلة ميكانيكية، وهو ما لا يمكن أن يحدث — إلا أن ذلك بالضبط هو ما عرضته تجارب جول.

وقد بدا جول متحمسًا لأعمال كونت رمفورد وآخرين، في دراسة ما إذا كان الشغل الميكانيكي يستطيع إنتاج حرارة. كان جهازه التجريبي يتكون من عجلة بألواح Padlle wheal داخل أسطوانة بها ماء (شكل ٤-٢) وضعت الريش داخل أسطوانة الماء بحيث تسمح بالكاد بمرورها، ولتحفظ الماء حتى لا يشكل حركة دوامية مع الألواح. أراد جول أن يرى هل سترتفع درجة حرارة الماء بدوران الألواح. كانت الريش لتأكيد أن الألواح الدوارة ستقلب الماء فقط، وأن المكونات الميكروسكوبية (أي الجزيئات) ستوضع في حركة أسرع. ومرة ثانية إذا ارتفعت درجة حرارة الماء، فإن ذلك لا بد أن يكون راجعًا إلى الشغل الميكانيكي المبذول لإدارة عجلة الألواح. وهكذا إذا سجل جول ارتفاعًا في درجة الحرارة، فسيصبح لديه دليل مباشر على أن الشغل يمكن أن ينتج الحرارة، وأخيرًا لا يمكن أن يتحدث المرء عن تدمير أو سحق الماء لجعله «يدمي» حرارة.

وعلى الرغم من أن الارتفاع في درجة الحرارة كان ضئيلًا، وكان على جول أن يصمم هذا الترمومتر فائق الحساسية الخاص به، فإنه لاحظ ارتفاعًا محددًا في درجة حرارة الماء بمجرد إدارة الألواح. شرع في إجراء تجربه لقياس كم من الحرارة ينتج

من كمية معينة من الشغل الميكانيكي. وبدلًا من مجرد إدارة الألواح باليد، قام بوضع أسطوانة فلزية معلقة بحبل يمر فوق بكرة يمكنها تدوير الألواح بسقوطها مسافة معينة مقيسة. وقد سبق أن عرفنا الشغل في هذا الفصل على أنه حاصل ضرب القوة في المسافة. وفي تجربة جول كانت القوة هي مجرد وزن الأسطوانة الفلزية، والمسافة هي الارتفاع الذي سمح للأسطوانة بالسقوط على طوله، وبذلك يمكنه قياس الشغل الميكانيكي بالضبط. وكان في مقدوره تحديد كمية الماء في تجربته، ومن الارتفاع في درجة الحرارة، والحرارة النوعية للماء، أمكنه استنتاج كمية الحرارة التي لا بد أن تكون قد تولدت. وهكذا حدد جول الشغل الميكانيكي المكافئ للحرارة. وقد أجرى تلك التجربة لعدد من المواد المختلفة مثل أنواع من الزيوت، ووجد دائمًا القيمة نفسها للمكافئ الميكانيكي للحرارة. وتوصل جول في النهاية إلى تحديد قيمة لا تختلف إلا في حدود ١ بالمائة أو أقل من القيمة المقبولة حديثًا. وتمثل هذه التجارب علامات في تاريخ العلم.

كانت هناك نتيجتان في غاية الأهمية لتجارب جول. النتيجة الأولى أن الشغل الميكانيكي يمكن أن يسبب ارتفاع درجة الحرارة. يستطيع الشغل أن ينتج حرارة، والحرارة لا تخضع للحفظ. ولا يمكن أن تكون النظرية السعرية صحيحة، وفي الحقيقة لا يوجد شيء اسمه المائع السعري الذي يمكن تخليقه وتدميره. ونحن نحتاج إلى نظرية أخرى للحرارة. والحرارة صورة من صور الطاقة، وفي الحقيقية يمكن للشغل الميكانيكي أن ينتج طاقة حركة أو طاقة وضع. وقد استعرض جول كيف أن الشغل ينتج أيضًا حرارة. ولذلك لا بد أن تكون الحرارة صورة من صور الطاقة.

أما النتيجة الهامة الثانية لتجارب جول فهي حل لغز (أو مفتاح) بناء نظرية جديدة للحرارة. وبسبب الريش في أسطوانة الماء، فإن دوران الألواح لا يستطيع أن يفعل شيئًا للماء عدا أنه يقلبه (يحركه). كان ذلك التقييد مقصودًا من جول، ولذلك لا بد من استنتاج أن الماء الذي يحركه أو يقلبه شيء هو ماء أدفأ. لكن ما الذي تم تحريكه أو تقليبه في الماء؟ والإجابة هي الجزيئات التي يتكون منها الماء. ولهذه الجزيئات الصيغة الكيميائية المألوفة H_2O، بمعنى أنها تتكون من ذرتي هيدروجين وذرة واحدة من الأكسجين. لا بد أن الجريئات هي التي تحركت، وكلما تحركت أكثر أصبحت المادة أدفأ. ولا بد أن ترتبط درجة الحرارة بالطاقة التي تحرك هذه الجزيئات الميكروسكوبية. وهكذا لا يمكن فهم الحرارة إلا بمدلول حركة الجزيئات، كما هي موصوفة في النموذج الجزيئي للمادة.

في سنة ٤٠٠ ق.م اقترح الفيلسوف الإغريقي ديمقريطس Democritus أن العالم مصنوع من عدد قليل من وحدات البناء، وهي من الصغر بحيث لا يمكن تمييزها بالعين، وأطلق عليها ذرات atoms. وكان الاعتقاد أصلًا أن هناك عددًا قليلًا من أنواع الذرات. وفيما بعد كان هناك اعتقاد خاطئ بوجود نوع مختلف من الذرات لكل مادة مختلفة، مثل الخشب، والصخر، والهواء، وغيرها. ونحن نعرف الآن أن هناك مئات الآلاف من المواد الكيميائية المختلفة التي تسمى* الآن مركبات. وأصغر كمية من المركب تسمى جزيئًا molecule، وليس ذرة. إلا أن الجزيئات تتكون من ذرات، يوجد منها حوالي مائة نوع مختلف كيمائيًّا. وكل ذرة تنتمي لأحد العناصر، بدءًا من الهيدروجين وحتى اليورانيوم. وتخضع الجزيئات ومكوناتها من الذرات لقوانين الميكانيكا وكذلك لقوانين الحفاظ على الطاقة وكمية الحركة. والقوة السائدة هي الكهربية وليست الجاذبية.

لا بد من ملاحظة أننا نعرف الآن أنه حتى الأجسام المعرفة كذرات ليست هي وحدات البناء الأساسية في الطبيعة كما كان مفترضًا في الأصل. فالذرات نفسها تتكون من بروتونات ونيوترونات وإلكترونات. ويبدو الآن أن البروتونات والنيوترونات تتكون من وحدات أصغر تسمى كوارك. ومع ذلك، لكي نفهم الحرارة، يحتاج المرء أن يدرس طبيعة الجزيء.

خذ في اعتبارك ما يحدث لجزيء مادة مثل الماء عندما تتحول المادة من غاز (بخار) إلى سائل (ماء)، وأخيرًا إلى جامد (جليد). عندما تكون المادة غازًا، لا ترتبط الجزيئات في الأساس بعضها ببعض بالمرة. ويتحرك كل جزيء بحرية في أي اتجاه مهما كان ويدور في حركة مغزلية. وبالنسبة لنا تحت ضغط عادي (مثل ضغط الغلاف الجوي الذي حولنا)، لا تتحرك الجزيئات مسافات كبيرة في أي اتجاه قبل أن تتصادم مع جزيئات أخرى. وسترتد عن بعضها تبعًا لقوانين نيوتن للحركة وقوانين الحفاظ على كمية الحركة وطاقة الحركة. فإذ أضفنا غازًا إلى آخر، مثل أن تطلق رذاذًا من عطر في أحد أركان الغرفة، فإن جزيئات الغاز الجديد، بعد الكثير من التصادمات مع جزيئات الغاز الأصلي، ستنتشر في كل الاتجاهات. وسرعان ما سنكتشف العطر في كل الغرفة؛ حيث اختلطت جزيئات العطر تمامًا بجزئيات الهواء الأصلي.

*أصبح العدد الآن عدة ملايين مركب. (المترجمان)

ومع تبريد الغاز، تبطئ الجزيئات من حركتها أكثر، ولا تتصادم مع بعضها بسرعات كبيرة كما كان الحال عندما كان الغاز أدفأ. وعندما يبرد الغاز كفاية، فنحن نعرف أنه سيتكثف إلى الحالة السائلة، حيث الجزيئات ما زالت إلى حدٍّ ما حرة لتنتقل وتتصادم مع بعضها أثناء حركتها. إلا أنه توجد قوة تجاذب صغيرة بين كل الجزيئات (وهي كهربية أصلًا)، وهذه القوة الصغيرة من كل الجزيئات المجاورة تضاف إلى بعضها، فتمنع الجزيئات المفردة من الهرب من الكل ومغادرة السائل. وهكذا سيظل السائل موجودًا كسائل حتى بدون سدادة فترة طويلة من الزمن. ونحن نعرف أن معظم السوائل الشائعة ستتبخر ببطء. ويفسر ذلك بملاحظة أنه أحيانًا وصدفة قد يصطدم جزيء بجزيئين آخرين أو أكثر بسرعة وعلى فترات قصيرة متتالية وفي اتجاه سطح السائل. وهذا يعطي الجزيء سرعة متجهة كبيرة على غير العادة، تمكنه من التغلب على محصلة القوى التي تؤثر عليه من كل الجزيئات الأخرى، وسيهرب من السائل (إذا لم يكن هناك صدمات معترضة له.)

وإذا برد السائل بما يكفي، فسيتجمد في النهاية على شكل جامد. وفي الجوامد تتحرك الجزيئات ببطء شديد حتى إن القوى الصغيرة التي تؤثر على جزيء من الجزيئات المجاورة ستمسك بالجزيء في مكان واحد. ولن يصبح الجزيء حرًّا الآن ليتحرك بين الجزيئات الأخرى. والحركة الوحيدة التي يستطيعها هي الحركة الاهتزازية (التذبذبية) حول موقعه في الجامد.

وقد تم التحقق من الوصف الجزيئي لحالات المادة مرارًا وتكرارًا بواسطة الكثير من التجارب الدقيقة. ولا توجد هنا «ظاهرة مشكلة» تشكك في دقة الشرح التفصيلي لمرور المادة من الحالة الغازية إلى الحالة الجامدة بانخفاض درجة الحرارة. (ومع ذلك، كثير من تفاصيل هذه التحولات ما زالت غير مفهومة بالكامل.) وبذا، فإن الغازات والسوائل والجوامد كلها تتكون من جسيمات (الجزيئات) تتحرك وتخضع لقوانين الميكانيكا.

ويمكن الآن فهم كثير من المناقشات السابقة بالتفصيل. فإدخال الحرارة يجعل الجزيئات تتحرك أسرع، وإزالة الحرارة تتسبب في جعلها تتحرك أكثر بطأً. وإذا كانت الجزيئات تتحرك سريعًا جدًّا، تكون المادة «ساخنة». وفي الحقيقة، فإن درجة حرارة الغاز (الذي تتداخل جزيئاته فقط بواسطة تصادمات مرنة) هي ببساطة مقياس لمتوسط طاقة الحركة الانتقالية العشوائية لكل الجزيئات. والسرعة المتوسطة لجزيء الهيدروجين في غاز الهيدروجين في درجة حرارة الغرفة العادية قد وجدت

مساوية تقريبًا لـ ٤٠٠٠ ميل في الساعة: (جزيئات الأكسجين، التي هي أثقل ١٦ مرة من الهيدروجين، وفي درجة الحرارة نفسها، وبذا لها متوسط الطاقة نفسه، لها سرعة ١٠٠٠ ميل في الساعة — ولنتذكر أن طاقة الحركة تحسب من $(1/2)mv^2$.) ونظرًا لوجود مليون بليون بليون جزيء في كل قدم مكعب من الهواء، فإن جزيئات الغاز يتصادم بعضها ببعض بصورة متكررة (يتعرض كل جزيء لصدمات من الجزيئات الأخرى تصل إلى حوالي ١٠٠ بليون مرة في الثانية.)

ومن المثير ملاحظة أن أحد أوائل طرق التحقق المباشر من الطبيعة الجزيئية للمادة قد قدمه ألبرت أينشتاين، الذي فسر الحركة المشاهدة للجسيمات الصغيرة جدًّا المعلقة في محلول، وتسمى هذه الحركة بالحركة البراونية Brownian movement وهي حركة بها قدر كبير من عدم الانتظام، حيث تتحرك الجسيمات مسافات قصيرة في اتجاه واحد ثم تغيره بسرعة في اتجاه آخر ثم بسرعة في اتجاه ثالث، وهكذا. وقد فسر أينشتاين (وأثبت ذلك كميًّا) هذه الحركة التي يتسبب فيها قذف هذه الجسيمات الصغيرة بواسطة جزيئات السائل المفردة الأصغر منها.* ويمكن رؤية النوع نفسه من الحركة في جسيمات الغبار التي تجعل «شعاع الشمس» مرئيًّا.

ويمكن للمرء الآن أن يفهم كذلك لماذا يمارس الغاز ضغطًا مثل ما يفعل في إطار السيارة. تضرب الجزيئات المنفردة للغاز بسرعة جوانب الإطار محتفظة بشكله. والجزيئات المنفردة خفيفة جدًّا، لكنها تتحرك بسرعة، وتضرب أعداد كبيرة منها جدار الإطار كل ثانية. ويمثل الضغط متوسط القوة التي تمارسها الجزيئات على الجدار كلما ضربت وارتدت. وبالطبع تمارس جزيئات الهواء ضغطًا على الجانب الخارجي للإطار، أي على الجانب الآخر من الإطار في الوقت الذي تمارس فيه الجزيئات في الداخل ضغطها. وهناك جزيئات أكثر في وحدة الحجوم في الداخل، غير أن هناك يكون الضغط الداخلي أكبر من الضغط الخارجي بمقدار ما يحفظ المركبة بالضرورة. ونحصل على الضغط الزائد داخل الإطار بإجبار (من مضخة هواء) المزيد من الجزيئات في وحدة الحجوم على الدخول إلى الإطار أكثر من تلك الموجودة في الخارج. فإذا رفعنا درجة حرارة الغاز (الهواء) داخل الإطار، فإن الضغط سيزيد

*الجسيمات المشاهدة في الحركة البراونية يمكن رؤيتها بميكروسكوب ليس قويًّا. أما الجزيئات فإنها من الصغر بحيث لا يمكن رؤيتها بأي شكل تفصيلي حتى بواسطة أقوى الميكروسكوبات المتاحة الآن. وحتى أعمال أينشتاين كان الكثير من العلماء يشعرون بأنه لا يوجد أدلة مقنعة على وجود الجزيئات. وقد نشر أينشتاين أبحاثه في السنة نفسها (١٩٠٥) التي نشر فيها أول مقالة عن النظرية النسبية (الفصل ٦).

أيضًا، لأن الجزيئات ستملك طاقة حركة أكبر. ومثل هذه الزيادة في الضغط تحدث عندما يصبح الإطار أسخن بعد رحلة طويلة في يوم حار. ويؤدي انثناء الإطار إلى تحرك الجزيئات أكثر، تمامًا مثل تجربة جول.

ويمكن الآن فهم الحرارة النوعية أيضًا. ولتتذكر أن الحرارة النوعية لمادة هي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة جرام واحد درجة واحدة سلزية، ويعني ذلك زيادة متوسط طاقة الحركة للجزيئات. واعتمادًا على الترتيب الهندسي الفعلي للذرات في الجزيء أو في الجامد، من الممكن حدوث أنماط مختلفة للحركة (قد تتضمن هذه الأنماط الاهتزاز أو الذبذبة الداخلية). وهكذا ستكون الحرارة النوعية للمواد المختلفة مختلفة؛ لأن متوسط أنماط التذبذب الداخلي لها سيكون مختلفًا. وبالمثل يمكن للمرء أن يفهم الحرارة الكامنة. فمثلًا لجعل سائل يغلي، لا بد من تزويده بما يكفي من الحرارة للتغلب على محصلة القوى المؤثرة على جزيء منفرد والناتجة عن كل الجزيئات الأخرى التي ما زالت في الحالة السائلة، ولذلك فإننا لا نرى ارتفاعًا في درجة الحرارة للجزيئات المتبقية في السائل. وبمجرد امتصاص ما يكفي من الحرارة للتغلب على الأربطة بين الجزيئات وغليان السائل متحولًا إلى غاز، فإن أي حرارة إضافية ستستخدم في زيادة طاقة حركة الجزيئات وسيحدث ارتفاع في درجة الحرارة.

يقوم النموذج الحركي-الجزيئي للمادة باختزال مشكلة فهم الحرارة وحالات المادة إلى فهم منظومات الجسيمات والقوى التي تربط بينها والتي تخضع لقوانين الميكانيكا. ويظهر أن نجاح هذا النموذج قد جعل قوانين الميكانيكا تسمح بوصف موحد لسلوك كل الأجسام، الكبيرة والصغيرة، وبكل التفاصيل. ولم توضع أي قيود على عالمية قوانين نيوتن (سنناقشها في الفصلين ٦، و٧) إلا مع تطوير نظرية الكم والنظرية النسبية في القرن العشرين.

الحفاظ على الطاقة

لقد تعلمنا ما فيه الكفاية لنقر بأن الحرارة بالتأكيد صورة أخرى من صور الطاقة، هي وطاقة الحركة وطاقة الوضع. وفي مناقشة المنظومات المحافظة (مثل البندول) استنتجنا أن الطاقة الميكانيكية الكلية لمنظومة يتم الحفاظ عليها ثابتة تقريبًا. وحقيقة أن البندول سيتوقف في النهاية تبين أن الطاقة الكلية المحسوبة كناتج جمع

طاقة الحركة وطاقة الوضع لا يتم بالضبط المحافظة عليها. ويبدو على الأرجح أن الاحتكاك في نقطة المحور وبين ثقل البندول والهواء يجعله يتباطأ.

وقد رأينا الآن أن الاحتكاك يولد حرارة (تجربة كونت رمفورد) وأن الحرارة صورة من صور الطاقة. ويبدو معقولًا فقط أن ترى ما إذا كانت الكمية الكلية من الحرارة التي ولدها البندول مساوية بالضبط للطاقة الميكانيكية التي فقدها أم لا، إلا أن تلك تجربة يصعب إجراؤها بدقة. فلا بد من إيجاد وسيلة لقياس كمية الحرارة الناتجة ومعرفة أنها تمثل كمية الطاقة التي فقدها البندول. قام جول بقياس كمية الحرارة التي تنتج عن كمية معينة محدودة من الشغل الميكانيكي، وطبعًا الشغل ينتج طاقة. لكن كيف يمكن التأكد من أن بعض الطاقة لا تفقد؟ فإذا كانت الحرارة الناتجة من تجربة جول يمكن تحويلها كلها ثانية إلى طاقة ميكانيكية (طاقة حركة أو طاقة وضع)، إذن لتم إثبات الحفاظ على الطاقة. لكن اتضح أن الطاقة الحرارية لا يمكن أبدًا أن تتحول كلية إلى صورة أخرى من صور الطاقة (سنناقش ذلك بالتفصيل في الفصل القادم). وهكذا، كيف أصبح عدد قليل من العلماء أصلًا يعتقدون أنه بتضمين الحرارة كصورة أخرى من صور الطاقة، فإن الطاقة الكلية لمنظومة معزولة يتم الحفاظ عليها؟

وربما كان أول شخص يصبح مقتنعًا باستفاضة بأن الطاقة يتم الحفاظ عليها هو الطبيب الألماني جوليوس روبرت ماير Julius Robert Mayer (١٨١٢–١٨٧٨). عمل ماير جرّاحًا على سفينة في رحلة إلى جاوه في ١٨٤٠. وقد لاحظ أثناء معالجة أعضاء الطاقم أن الدم في عروقهم كان أكثر احمرارًا في المناطق الحارة منه في ألمانيا. وكان ماير قد سمع بنظرية للافوازييه أن حرارة الجسم مصدرها الأكسدة في أنسجة الجسم باستخدام الأكسجين الذي في الدم. أرجع ماير ذلك إلى أن الجسم في المناطق الحارة يحتاج إلى إنتاج حرارة أقل من التي يحتاجها في ألمانيا، فالدم قد صار أكثر احمرارًا لأن ما أزيل من أكسجينه أصبح أقل.

تحير ماير لهذه الظاهرة واستمر يفكر فيها وفيما وراءها. وقد لاحظ أن حرارة الجسم لا بد أن تدفئ الوسط المحيط. ومصدر هذه الحرارة بالطبع هو أكسدة الدم الذي يسير داخل الجسم. لكن هناك طريقة أخرى يستطيع بها الجسم تدفئة الوسط المحيط — بالقيام بعمل يتضمن احتكاكًا. وأخذ ماير يفكر ما مصدر هذا النوع من الحرارة. وقد استنتج أن مصدرها لا بد أن يكون أيضًا من أكسدة أنسجة الجسم بواسطة الدم أصلًا. وبذلك تدخل عملية الأكسدة حرارة في الوسط المحيط

مباشرة، بإشعاع حرارة من الجسم بطريقة غير مباشرة من خلال الارتباط مع الشغل الميكانيكي (عمل العضلات). ولأن الحرارة في الحالتين لا بد أن تتناسب مع الأكسجين المستهلك، لذلك فإن كمية الشغل الميكانيكي هي التي لا بد أن تحل محل جزء منه. ولذلك اعتقد ماير أن الحرارة والشغل لا بد أن يكونا متكافئين، أي أن عددًا من وحدات أحدهما لا بد أن تساوي بالضبط عددًا مختلفًا من وحدات الآخر. فكر ماير أبعد من ذلك، في أن الطاقة المختزنة أصلًا في الطعام كانت تتحول أثناء عملية الأكسدة إلى طاقة في صورة حرارة وشغل ميكانيكي. وكانت هذه هي بداية فكرة ماير حول الحفاظ على الطاقة.

كان كل ذلك سهلًا نسبيًّا بالنسبية لماير، وعلى الأرجح كان ذلك سهلًا لأنه أهمل النظرية السعرية. ولم يعتبر أن الحرارة نفسها هي التي يتم الحفاظ عليها — أي أنها لا يمكن أن تخلق حيث لم يكن هناك حرارة من قبل، كما هو متطلب بواسطة النظرية السعرية. وقد افترض أن كل هذه الحرارة من الجسم كانت حرارة جديدة. وكان إهمال نظرية مقبولة بالتأكيد هو شيء ثمين في البداية، لكنه سبب له فيما بعد صعوبة في جعل أفكاره تنتشر. وبعد تفكير وبحث مستفيض نشر ماير كُتيبًا خاصًّا بعنوان «الحركة العضوية في ارتباطها بالتغذية» organic motion in its Connection with nutrition الذي اعترف فيه بوجود صور متنوعة للطاقة. تضمنت هذه الصور الطاقة الميكانيكية والكيميائية والحرارية، والكهرومغناطيسية، والحرارة والطعام. وقد اقترح أن الشمس هي المصدر النهائي لكل هذه الطاقات، وذلك سابق لعصره بثمانين سنة.

كان اقتراح ماير بأن الطاقة يتم الحفاظ عليها موضع سخرية وازدراء، وقد تم إهماله ببساطة للغته العتيقة واستخدامه للميتافيزيقيا أو أحيانًا لفيزياء غير صحيحة. وعلى الرغم من أنه قد أنفق سنوات ليقنع العلماء باستنتاجاته، فقد رأى الآخرين يحصلون على التقدير من أجل أفكاره هو، ففقد عقله مؤقتًا نتيجة الإحباط الكبير.

وعلى الرغم من أن جوليوس ماير ربما كان أول عالم (وهو ما كان فعلًا) يتعرف على قانون الحفاظ على الطاقة، فإن الأبحاث المستفيضة لجول، الذي وصفنا تجربته بالعجلة الدوارة سابقًا، هي التي أدت إلى تقبل المجتمع لهذه الفكرة. اعترف وليام طومسون William Thomson المشهور باللورد كلفن Lord Kelvin، عالم الفيزياء البريطاني المعروف جيدًا من منتصف القرن التاسع عشر؛ بأهمية أعمال جول التي

اكتسبت قبولًا من الجمعية الملكية بلندن. كان كلفن في الأصل من الأنصار المخلصين للنظرية السعرية، وكان على دراية بالأعمال المستفيضة لكارنوت على الآلات الحرارية. ومع ذلك، أقر في النهاية بأن أعمال جول قد قدمت حلًّا حيويًّا للتحليل الصحيح للآلات الحرارية. فكمية الحرارة المنتقلة إلى المستودع ذي درجة الحرارة المنخفضة (الجو المحيط) كانت أقل من كمية الحرارة المستخدمة من المستودع ذي درجة الحرارة الأعلى (البخار في غرفة التكثيف)، وكان الفرق موجودًا في الشغل الميكانيكي المبذول. ولا بد أن تكون الحرارة والشغل الميكانيكي صورتين للشيء نفسه: الطاقة. كان تعرف كلفن على هذه الحقيقة بالنسبة للآلات الحرارية خطوة في غاية الأهمية لتطوير مفهوم الطاقة.

استمر جول في إجراء تجارب دقيقة بعناية وقد أصبح قادرًا على إثبات أن الطاقة الكهربية يمكن أن تتحول إلى حرارة في علاقة محدودة، وأنه في النهاية فإن الطاقة الكهربية والحرارة من الممكن تحويل إحداهما إلى الأخرى. وكان معروفًا في ذلك الوقت أن بعض التفاعلات الكيميائية يمكنها توليد تيار كهربي، وأن المسرح قد أصبح معدًّا أخيرًا للإقرار بأن الطاقة لها أشكال متعددة ويمكن تحويل أحد هذه الأشكال إلى آخر.

وفي الوقت الذي أنهى فيه جول الكثير من هذه التجارب المشهورة الآن، أصبح فيما يبدو مقتنعًا بأن الطاقة هي شيء لا يمكن فناؤه، ولكن يمكن فقط تحويله من صورة إلى أخرى. وفي السنوات القليلة الأولى (بدءًا من ١٨٤٥) التي طرح فيها جول نظرية الحفاظ على الطاقة، لم يصدق أحد تقريبًا أنه كان على صواب. وظل الحال كذلك إلى أن أصبح اللورد كلفن مقتنعًا بأن تجارب جول كانت صحيحة، ورأى الارتباط بين الفهم الجديد لسريان الحرارة في الآلة البخارية، ثم دعم فكرة جول، عندما بدأ العالم يتقبل فكرة الحفاظ على الطاقة.

كان هناك أيضًا مكتشف مشارك ثالث لفكرة الحفاظ على الطاقة، هو الطبيب الألماني هرمان فون هلمهولتز Hermann von Helmholtz. ففي سنة ١٨٤٧ عندما كان في السادسة والعشرين، قدم بحثًا بعنوان «حول الحفاظ على القوة»، وعلى الرغم من أنه لم يكن يعلم بأعمال ماير، ولم يسمع بتجارب جول إلا قرب نهاية أبحاثه، استنتج هلمهولتز أن الطاقة لا بد أن يكون لها أشكال كثيرة مختلفة، وأنه يتم الحفاظ على كميتها الكلية. وقد توصل إلى هذا الاستنتاج لأنه كان يعتقد أن الحرارة والضوء والكهرباء وغيرها كلها صور للحركة، ولذلك فهي صور للطاقة الميكانيكية

(طاقة الحركة). لا بد أن الأمر كان واضحًا بالنسبة لهلمهولتز أن طاقة الحركة يتم الحفاظ عليها دائمًا، ليس فقط في التصادمات المرنة، بل في جميع التصادمات، لأنها ذهبت في صور أخرى كانت في الحقيقة أيضًا طاقة حركة. وكان الكثير مما اقترحه هلمهولتز بهذا الشكل الجريء قد ثبت أنه صحيح، على الرغم من أنه ليست كل صور الطاقة يمكن اختزالها إلى طاقة حركة. وكان رد الفعل المباشر لبحثه غير مشجع، ويتفق معظم مؤرخي العلوم على أن تجارب جول المدعمة بسمعة وتأثير اللورد كلفن، هي التي أقنعت الفيزيائيين أخيرًا من منتصف القرن التاسع عشر بأن هناك في الحقيقة قانون للحفاظ على الطاقة.

ولنسترجع عرضًا عامًّا لما نُوقش حتى الآن. قلنا إن الحرارة صورة من صور الطاقة، وإنه عند حساب الطاقة بكل صورها، فإن الكمية الكلية في منظومة معزولة يحافظ عليها. وهذا هو قانون الحفاظ على الطاقة. إذن فما هي كل الصور الممكنة للطاقة؟

أساسًا، ولغرض المناقشة الحالية، يمكن اعتبار أن الطاقة موجودة في صورة أو أكثر من الصور الخمس الرئيسية: (١) حركة، (٢) حرارة، (٣) وضع، (٤) إشعاعية، (٥) كتلة.

وطاقة الحركة هي نصف (أو $(1/2)mv^2$) الطاقة الملازمة للجسم التي ترجع لحركته المنتظمة. وقد ناقشنا الحرارة بشيء من التفصيل، وهي الطاقة المضافة (أو المأخوذة) على النموذج الميكروسكوبي للحركة (غير المنتظمة) لجزيئات المادة المنفردة. وتتحدد كمية الحرارة بواسطة التغير في درجة حرارة الجسم (متوسط طاقة الحركة الميكروسكوبية للجزيئات.) أما طاقة الوضع فهي الطاقة الملازمة للشكل والهيئة، ووضع الجسم في مجال قوة. وقد أدخلت أول مرة كطاقة وضع جاذبية، ولكن بسبب أبحاث جول وآخرين فهي تعرف الآن بعدة صور. وبعض هذه الصور تتضمن: (١) جاذبية، (٢) كهربية، (٣) كيميائية (كهربية على المستوى الميكروسكوبي)، (٤) نووية.

وحينما تظهر الطاقة في أحد هذه الأشكال من طاقة الوضع، فمن الممكن (على الرغم من أنه ليس عمليًّا دائمًا) تحويل الطاقة كلية إلى طاقة حركة أو طاقة حرارية (وهي طاقة حركة عشوائية ميكروسكوبية). والصورة الرابعة الرئيسية للطاقة المذكورة تحت اسم طاقة إشعاعية هي إشعاعات كهرومغناطيسية مثل الضوء، وهي الصورة التي لم تناقش هنا. وظلت الطاقة الإشعاعية فترة طويلة يعتقد أنها شكل

من أشكال الحرارة، إلا أنها ليست كذلك. فالطاقة الإشعاعية شكل من أشكال الطاقة يمكن تحويله كلية إلى أحد الأشكال الأخرى.

والكتلة صورة من صور الطاقة اقترحها أينشتاين سنة ١٩٠٥ (راجع فصل ٦) وتم التحقق منها بعد حوالي ثلاثين سنة عندما أجريت تجارب نووية معينة روقبت بدقة. وحتى أبحاث أينشتاين كان المعتقد أن هناك قوانين حفاظ منفصلة للطاقة وللكتلة. وقد ضمن نيوتن قانون الحفاظ على الكتلة في كتابه برينكيبيا. وفي الحقيقة، يتم الحفاظ علي الكتلة وكل صور الطاقة الأخرى منفصلة بدرجة عالية، إلا إذا كانت العملية تتضمن تفاعلات نووية أو سرعات عالية جدًّا. ولا تتضمن التفاعلات الكيمائية العادية مثل الأكسدة إلا تحويلات في غاية الضآلة للكتلة إلى طاقة والعكس صحيح. ولأن التفاعلات النووية لا تحدث طبيعيًّا على سطح الأرض (ما عدا في المواد المشعة التي لم تُلاحظ حتى سنة ١٨٩٦)، فإن الأبحاث المبكرة التي أرست أولًا قانون الحفاظ على الطاقة لم يكن لديها المبرر لتعتبر الكتلة صورة أخرى من صور الطاقة.

وإحدى الكميات التي يلزم تحديدها لتوصيف المنظومة توصيفًا كاملًا ترى الآن على أنها الطاقة الكلية للمنظومة. ولا بد للمرء أن يحدد ليس فقط الحجم والكتلة ودرجة الحرارة وغيرها للمنظومة، بل طاقتها الكلية كذلك. وذلك أكثر مواءمة بوضوح عن مجرد إيراد المحتوى الحراري، الأمر الذي كان يحدث غالبًا قبل تطوير مفهوم الطاقة تطويرًا شاملًا.

من الممكن تحليل عمل المنظومة لحساب الكمية الكلية للطاقة، وكيف تتغير من شكل إلى آخر. وبالنسبة لنظام معزول، فإننا نعلم الآن أنه إذا اختفي جزء من الطاقة في أحد الأشكال فلا بد من معاودة ظهوره في شكل آخر. وتمدنا هذه الحقيقة بمفتاح هام في تحليل الأنظمة. ولنأخذ الآلة الحرارية كمثال. فإن بذلنا شغلًا على الآلة، فلا بد أن تكون الطاقة قد جاءت من مكان ما لإتمام العملية. وعلى العكس، إذا بذلت الآلة شغلًا، فإنها توفر كمية محددة جدًّا من الطاقة لشيء آخر. وقد تكون الطاقة التي تمدنا بها طاقة حركة (زيادة سرعة سيارة) أو طاقة وضع (رفع وزن ما). وفي الفصل القادم سنناقش كيف تمكن رودلف كلاوسيوس Rudolf clausius (١٨٢٢-١٨٨٨) من إعادة تحليل عمل الآلة الحرارية بدرجة وعي بهذا القانون للحفاظ على الطاقة. وقد عرض أن الحرارة على الرغم من أنها بالقطع صورة من

صور الطاقة، فإنها صورة خاصة جدًّا. وعند تطبيق قانون الحفاظ على الطاقة أصبح يعرف باسم القانون الأول للديناميكا الحرارية.

ربما علينا أن نضع في اعتبارنا ولو للحظة فقط ما هي هذه الطاقة التي يتم الحفاظ على كميتها الكلية في نظام معزول. وأول شيء يجب ملاحظته أنها بكل تحديد كمية مجردة. فالطاقة ليست نوعًا من المادة ويعرف كل نوع من أنواع الطاقة بواسطة بعض المعادلات الرياضية. وفوق ذلك، فإن للطاقة طبيعة نسبية. فطاقة وضع الجاذبية تقاس عادة بالنسبة لسطح الأرض. ورغم ذلك، أحيانًا يقيس المرء كم من طاقة الوضع يملك الجسم بالنسبة لأرضية غرفة، أو بالنسبة لقمة منضدة، وهكذا. وما يهم المرء فقط هو كم من طاقة الوضع يملك الجسم بالنسبة لأجسام أخرى من حوله. كذلك لطاقة الحركة طبيعة نسبية، لأن طاقة الحركة تقاس على أنها كمية $(1/2)mv^2$ حيث v السرعة المتجهة مقيسة بالنسبة لمرجع اختياري. وقد يكون المرجع المختار هو كوكب الأرض، أو أرضية الغرفة، أو سيارة متحركة، أو القمر، أو أيًّا ما كان ويبدو مناسبًا للموقف. وكل طاقات الوضع والحركة نسبية.

وما علينا فهمه عن الطاقة هو أن التغير في الطاقة فقط ذو مغزى. وليس لنا حاجة أن نقتفي ونتتبع طاقات الوضع أو طاقات الحركة لجسم إلا إذا كانت هذه الطاقات في طريقها لتتغير. فمثلًا يظهر «التغير» في طاقة الوضع كتغير في طاقة الحركة (أو العكس بالعكس). وهذه التغيرات في الطاقة هامة بشكل خاص عندما نتناول الأنظمة المتداخلة. وفي الحقيقة، تحدث التداخلات بواسطة تغيرات الطاقة. وقد يكون من المهم معرفة ما إذا كان أحد الأنظمة يفقد كمية معينة من الطاقة، ونظام آخر (إذا كان هناك نظامان فقط) لا بد أن يكتسب تلك الكمية بالضبط. ويستخدم العلماء والمهندسون قانون الحفاظ على الطاقة باستمرار في تحليل أو تصميم الأنظمة المتضمنة لانتقالات الطاقة.

والعلاقة بين الطاقة ومفهوم الفيزيائيين عن الشغل مهمة جدًّا. فالشغل يعرف على أنه القوة التي تؤثر في مسافة. والشغل في الحقيقة هو كيف تجري الأعمال في العالم. وفيما عدا التفكير الذي يعد شغلًا (بواسطة معظم الناس) فإن الشغل عند الفيزيائيين متضمن في كل أشكال الشغل التي نحن على دراية بها. ينتج الشغل طاقة (إما حركية أو طاقة وضع مثلًا) وتستطيع الطاقة أداء شغل. ومن وجهة نظر نفعية ربما يكون ذلك هو أفضل ما فهمنا عن ماهية الطاقة. فالطاقة لها القدرة على أداء شغل، وهي تستطيع جعل القوة تؤثر على طول مسافة معينة.

كانت الحرارة مائعًا كما كان يعتقد في الأصل، لكن الآن تم الاعتراف بها كواحد من الأشكال العديدة للطاقة. والطاقة ليست أي مادة (كما كان يظن بالحرارة) بالفعل. فالطاقة فكرة مجردة تمامًا. وهي متلازمة مع الحركة أو الوضع أو الاهتزاز (الذبذبة)، وتُحدَّد من تعبيرات رياضية لكل صورة من صورها. ويمكن تحويل الطاقة التي تؤثر على الأجسام (أشار هلمهولتز إلى قانون الحفاظ على الطاقة كقانون الحفاظ على القوة، وذلك قبل أن يتم التفريق بين القوة والطاقة.) وأصبح الحفاظ على الطاقة مفهومًا هامًّا. «وتختار» الطبيعة أن تحفظ كمية هذا الشيء المجرد بقيمة ثابتة خلال الكثير من تحولات الطاقة من صورة إلى أخرى، وهو أمر مدهش تمامًا، ومن المهم معرفته من وجهة النظر العملية.

ولنختتم هذا الفصل، فكر في تحليل منظومة طاقة شائعة — تدفئة منزل بواسطة نظام مقاومة كهربية — كعرض لمفهوم الطاقة. في معظم أجزاء الولايات المتحدة، يتم إنتاج القدرة الكهربية عن طريق حرق الوقود الحفري. والطاقة بذلك كانت في الأصل مخزونة على شكل طاقة وضع كيميائية في الوقود الحفري. تتحول هذه الطاقة إلى طاقة حرارية بواسطة حرق الوقود الحفري. تتحول الطاقة الحرارية إلى طاقة حركة في تيار موجه من الغازات الساخنة التي تمارس ضغطًا على ريش آلة توربين فتجعله يقوم بشغل ميكانيكي. تدير آلة التوربين عمود مولد كهربي، فيحول الشغل إلى طاقة كهربية. تنتقل بعد ذلك تلك الطاقة الكهربية إلى المنازل لتدفئتها. وفي المنزل تتحول الطاقة الكهربية إلى كل من طاقة حرارية وطاقة إشعاعية في وحدة التسخين، ثم تمتص جزيئات الهواء في الغرفة هذه الطاقة، مما يمنح الجزيئات المزيد من الحركة العشوائية: الحرارة. (وبالطبع من الأفضل تعريف الحرارة على أنها الطاقة المنتقلة بين جسمين نتيجة للفرق في درجة حرارة الجسمين. ومع ذلك من الممكن ربط درجة حرارة الجسم بالحركة العشوائية لمكوناته، على الأقل في هذا الكتاب. وهذا مثال على الحاجة إلى تبسيط المواضيع المعقدة).

ولا يتطلب قانون الحفاظ على الطاقة أن تكون كمية الطاقة التي تصل أخيرًا إلى البيت على شكل حرارة، مساوية تمامًا في الكمية للطاقة المختزنة في الوقود الحفري؛ وتتضمن كل هذه العملية «فقدًا» في الطاقة عند كل خطوة. وربما ما يصل أخيرًا يكون أقل بوضوح من الكمية المتاحة في الأصل. ويتطلب قانون الحفاظ على الطاقة أن كل الطاقة تذهب إلى مكان ما. وعلى الأغلب يذهب البعض منها بالهروب من الشبكة على شكل حرارة، وترتفع درجة حرارة الوسط المحيط عند هذه النقطة. كما

يتطلب قانون الحفاظ على الطاقة كذلك أنه لا يمكن أن تتحرر طاقة أكثر من النظام عند أي نقطة أكثر من الطاقة الداخلة عند هذه النقطة. وقد اقتُرِحت مخططات كثيرة لتفعل ذلك، أي تطلق من الطاقة أكثر مما يدخل إليها. ويسمى أي تصميم ينتهك هذا القانون الأول للديناميكا الحرارية باسم آلة الحركة الأبدية (من النوع الأول) لأن بعض الطاقة المحررة يمكن أن تستخدم لإدارة الآلة نفسها. ولم ينجز أبدًا أي مخطط مثل هذا بنجاح، ويقف القانون الأول للديناميكا الحرارية كواحد من أهم المبادئ المعروفة التي تصف سلوك الطبيعة.

الفصل الخامس

الإنتروبيا والاحتمالية

تخبرنا الإنتروبيا أين نذهب



رودلف كلاوزيوس Rudolph Clausius
(المعهد الأمريكي للفيزياء، معمل نيلز بوهر).

فكرة الإنتروبيا entropy متأصلة وراسخة في حياتنا اليومية حتى إن حديقة الترفيه العامة في فلوريدا «إيبكوت» Epcot قد أهديث لها. غير أنه لا يمكن إدراك مفهوم الطاقة إلا إذا فهم المرء مفهوم الإنتروبيا. ومع ذلك فالإنتروبيا بالكاد يشار

إليها في إيبكوت، ربما لأنها تبدو داخلية وتخص عددًا قليلًا فقط. ومع ذلك فهي مفهوم في غاية الأهمية، وبالتحديد يمكن تطبيقه على الاهتمامات بالعجز في الطاقة في المجتمعات الصناعية الحديثة. فبينما كان يعتقد يومًا ما أن مصادر الطاقة لا حصر لها ومتاحة للاستعمال البشري، فإن بعض الناس الآن يتخوفون من أننا نخسر الآن الطاقة المتاحة، وأن هناك حاجة ملحة للحفاظ على الطاقة. (ليس ذلك هو نفسه الحفاظ على الطاقة الذي يعبر عنه القانون الأول للديناميكا الحرارية.) والافتقار إلى الطاقة هو افتقار حقيقي إلى الطاقة المتاحة والمفيدة و«النظيفة»، حيث تعني كلمتا مفيدة ونظيفة أنها تتحدد على الأقل جزئيًّا بواسطة التبعات الاقتصادية والسياسية والبيئية الممكنة التي تصاحب تحول الطاقة إلى شكل «مفيد».

والإتاحة في طاقة أي نظام ترتبط بالإنتروبيا الخاصة به. والإنتروبيا مع ذلك، ذات مغزى أكثر مما تبينه علاقتها بتحولات الطاقة. وهي هامة بالنسبة للكيمياء والعمليات الكيمائية بالتحديد، وهي جزء هام من دراسات العلماء والمهندسين. فمثلًا تحدد إنتروبيا المادة هل ستتواجد في صورة جامد أم سائل أم غاز، وما صعوبة التحول من حالة إلى أخرى من تلك الحالات. ويؤدي التفسير الميكروسكوبي لمفهوم الإنتروبيا إلى أفكار حول الترتيب وعدم الترتيب، والتنظيم وعدم التنظيم، واللاانعكاسية، والاحتمالات، في إطار نموذج الحركة الجزيئية للمادة. وقد توسعت تلك الأفكار وامتدت لتصبح جزءًا هامًّا في نظرية المعلومات ونظرية الاتصالات، وقد طبقت على الأنظمة الحية كذلك. وقد طبقت كذلك بالتشابه على الأنظمة السياسية والاقتصادية. ومع ذلك، يتناول الفصل الحالي — على الأغلب — تطوير مفهوم الإنتروبيا وتطبيقاتها على تحولات الطاقة، والانعكاسية واللاانعكاسية، والاتجاه الكلي للعمليات في المنظومة الفيزيائية.

وأحد أهم النتائج لمفهوم الإنتروبيا هو التعرف على الحرارة على أنها شكل «منحل» من الطاقة مقارنة بالصور الأخرى من الطاقة. وعندما تكون الطاقة على شكل حرارة، فإنها تنحل بمعنى أنها تصبح جزئيًّا غير متاحة للاستخدام، وهي الحقيقة التي لا بد من أخذها في الحسبان في تصميم أنظمة تحول الطاقة.

وتظل كمية الطاقة الداخلية الكلية نفسها ثابتة دائمًا فقط في الأنظمة المعزولة. وكما لاحظنا في فصل ٤، إذا كان النظام غير معزول، فإن قانون الحفاظ على الطاقة يصاغ بشكل مختلف، لكن بشكل مكافئ. يمكن توصيف حالة النظام أو وصفه على الأقل جزئيًّا بمدلول محتوى طاقته الداخلية الكلية. ويمكن وصف حالة

النظام أبعد من ذلك بمدلول خواص أخرى، مثل: درجة حرارته، وحجمه، وكتلته، وضغطه الداخلي، وظروفه الكهربية، وهكذا. وهذه الخواص التي يمكن قياسها كلها أو حسابها بطريقة ما، تسمى مؤشرات Parameters. فإذا تغيرت حالة النظام، فإن بعض المؤشرات في النظام لا بد أن تتغير. وبالتحديد، من الممكن أن يتغير محتوى طاقته الداخلية الكلية.

ينص قانون الحفاظ على الطاقة على أن أي تغير في الطاقة الداخلية للنظام لا بد أن يساوي كمية الطاقة المضافة للنظام أثناء التغير مطروحًا منها الطاقة التي أزيلت من النظام أثناء التغير. وبعبارة أخرى، ينص قانون الحفاظ على أنه من الممكن «مسك دفاتر» لمحتوى الطاقة في النظام: لا بد من احتساب أي زيادة أو نقص في محتوى الطاقة بمصطلحات الطاقة (في أي صورة) أضيفت أو أزيلت من النظام. ويسمى قانون الحفاظ على الطاقة المستخدم بهذا الشكل بالقانون الأول للديناميكا الحرارية First law of Thermodynamics.

ومفهوم الإنتروبيا والحفاظ عليها، على الرغم من أنه يجعل من الممكن وضع معادلة، فإنه لا يضع تحديدات على الكميات الداخلة في المعادلة. ولا يقدم أي فكرة عن كمية الطاقة التي يمكن أن تضاف أو تؤخذ وتزال، ولا عن أي قواعد، إذا كانت هناك قواعد، لا بد أن تحكم تحول الطاقة من صورة إلى أخرى. ولا ينص مفهوم الطاقة على جزء من طاقة النظام لا بد أن يوجد في صورة طاقة حركة أو حرارة أو طاقة وضع أو طاقة كهربية، وهكذا. وفي الحقيقة، وكما ناقشنا في الفصل السابق، ليست الطاقة مادة ملموسة على الإطلاق، ولا يمكننا حتى القول كم من الطاقة، بالمعنى المطلق، يملكها النظام، لأن الحركة والوضع نسبيان. وفقط تغيرات الطاقة — أي تحولات الطاقة — هي التي لها مغزى.

وهناك في الواقع قواعد تحكم تغيرات الطاقة. ويتعامل مفهوم الإنتروبيا والأفكار المرتبطة به مع هذه القواعد. وتاريخيًّا، فإن المفهوم قد تطور من دراسة «الحرارة» ودرجة الحرارة والإقرار بأن الحرارة هي صورة خاصة ليست قابلة للتحول تمامًا إلى صورة أخرى. أما الصور الأخرى، مع ذلك، فهي قابلة للتحول كلية إلى حرارة. وفوق ذلك، يبدو أنه في كل تحولات الطاقة من صورة إلى أخرى، لا بد من تحول بعض الطاقة إلى حرارة. وقد صاغ الفيزيائي الألماني رودلف كلاوزيوس Rudolph Clausius (١٨٢٢–١٨٨٨) في سنة ١٨٦٥ كلمة إنتروبيا (على الرغم من أنه قد طور المفهوم في ١٨٥٤) من الكلمة الإغريقية التي تعني «محتوى التحول».

والإنتروبيا كالطاقة، فهي متغير يمكن استخدامه لوصف حالة النظام. وخاصية النظام التي تصفها الإنتروبيا هي خاصية مجردة. فليس في الإمكان «الشعور» أو «الإحساس» بإنتروبيا نظام كما تحس أو تشعر بأي ثابت (أو عامل أو مؤشر) آخر مثل درجة الحرارة أو الحجم أو الكتلة. ومع ذلك فالإنتروبيا من الثوابت (أو العوامل أو المؤشرات)، وهي تحدد كيف تتوزع الطاقة الداخلية للنظام وكيف هي قابلة للتحول.

ويمكن تفسير الإنتروبيا (ودرجة الحرارة كذلك) في النهاية بمدلول المفاهيم الإحصائية التي تنشأ من نظرية الحركة الجزيئية للمادة التي ناقشناها في فصل ٤. وفي الحقيقة إن التأثير الشامل وقدرة مفهوم الطاقة نفسه لا يمكن تقبله بدون اعتبارات إحصائية وبدون الارتباط الناتج بين الطاقة ودرجة الحرارة والإنتروبيا. وقد تم تعميم فكرة الإنتروبيا من خلال هذا الارتباط بالإحصاء والاحتمالية، لتصبح وسيلة مفيدة لوصف الكميات النسبية للتنظيم (الترتيب في مواجهة عدم الترتيب)، وبذا فهي مفيدة لدراسة الحالات المتنوعة للمادة (غاز وسائل وجامد وبلازما وبلورات سائلة، وغيرها).

الحرارة ودرجة الحرارة

لفهم العلاقة بين مفاهيم الطاقة والإنتروبيا لا بد أولًا أن نميز بوضوح بين الحرارة ودرجة الحرارة. وأحد الطرق المفيدة لعمل ذلك هو استخدام النظرية السعرية للحرارة. (على الرغم من أن النظرية السعرية على خطأ، فإن التشابه فيها بين الحرارة ومائع يساعد في إدخال أفكار مجردة من الصعب إدخالها بدونه.) وتعبر السعة الحرارية للجسم عن العلاقة بين سريان الحرارة إلى الجسم ودرجة حرارته. وتعرف السعة الحرارية لجسم أو منظومة بأنها كمية الحرارة التي يأخذها لرفع درجة حرارته درجة واحدة (الفصل ٤)، بمعنى أن الجسم الذي يتمتع بسعة حرارية عالية يحتاج إلى قدر كبير من الحرارة لترتفع حرارته درجة واحدة. فمثلًا كستبان مملوء بماء مغلي يمكن أن تكون درجة حرارته أعلى من حوض استحمام مملوء بماء فاتر، ومع ذلك يستلزم الأمر طاقة حرارية أقل كثيرًا لرفع درجة حرارة الماء في الكستبان إلى درجة أعلى، أقل كثيرًا من الماء في حوض الاستحمام لأن الكستبان سعته الحرارية أقل كثيرًا.

وإذا نحينا النظرية السعرية للحرارة، فإن درجة الحرارة توصف بمدلول شدة أو تركيز الطاقة الجزئية الداخلية، أي الطاقة الجزئية الداخلية لكل وحدة كمية من المادة. ويمكن شرح الفرق بين درجة الحرارة والحرارة بمدلول نظرية الحركة الجزيئية للمادة، وذلك بوصف درجة الحرارة على أنها تتعلق بمتوسط طاقة أنماط الحركة الميكروسكوبية لكل جزيء، بينما تتعلق الحرارة بالطاقة الكلية لأنماط الحركة الميكروسكوبية لكل الجزيئات. فجزئيات الماء في الكستبان لها طاقة في المتوسط أكبر من جزيئات الماء في حوض الاستحمام، لكن الكستبان قد احتاج حرارة أقل من حوض الاستحمام؛ لأن به عددًا أقل بكثير من الجزيئات عما هو موجود في حوض الاستحمام.

على الرغم من أن درجة الحرارة يمكن شرحها بمدلول تركيز الطاقة الجزيئية، فإن الاستفادة الحقيقة من مفهوم درجة الحرارة تعتمد على سمتين أساسيتين أخريين للحرارة معترف بهما في خبرتنا اليومية: الاتزان الحراري، وسريان الحرارة. فمثلًا كيف تقرر الأم أن الطفل الذي يصرخ باكيًا، مريض بالحمى أم لا؟ إذا كان الطفل قد أكل، ولم يبلل حفاضته، وحفاضته نظيفة، فقد تلاحظ الأم أن وجهه محتقن وجبهته دافئة. تستعمل الأم عندئذ ترمومترًا لتأخذ درجة حرارة الطفل.

وتعتمد تقريبًا كل الترمومترات على وجود الاتزان الحراري. ويعني ذلك أنه إذا سمح لجسمين أو نظامين أن يتداخلا معًا فإنهما في النهاية سيكتسبان درجة الحرارة نفسها. واعتمادًا على الظروف المحيطة، فإن ذلك قد يحدث بسرعة أو ببطء، لكن في النهاية ستتغير درجة حرارة أحدهما أو كليهما بالشكل الذي يجعلهما في درجة الحرارة النهائية نفسها.

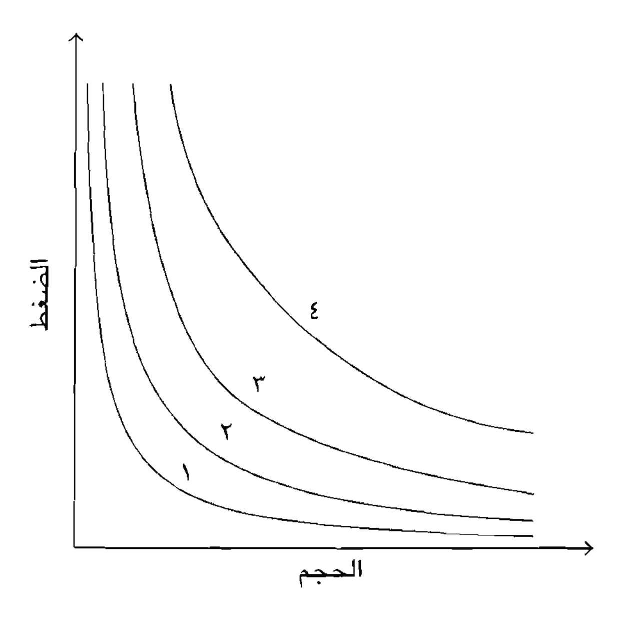
وبذا يعتمد أخذ درجة حرارة الطفل على التداخل بين الطفل وجسم ثان هو الترمومتر. تدخل الأم الترمومتر في مستقيم الطفل وتنتظر عدة دقائق. وبينما يجري التداخل تتغير حالة الترمومتر. وطول عمود الزئبق في داخل الترمومتر مؤشر على الترمومتر، وهو يزداد بارتفاع درجة حرارة الترمومتر. وعندما تصبح درجة حرارة الترمومتر هي نفسها درجة حرارة الطفل، لا يتغير طول الزئبق بعد ذلك، ولذا فإن الترمومتر في اتزان حراري داخليًّا ومع الطفل. وفقط بعد الوصول إلى الاتزان تزيل الأم الترمومتر من الطفل وتقرأ المقياس لتحدد درجة حرارة الطفل.

وفي الواقع لا يقيس الترمومتر درجة الحرارة مباشرة، ولكنه بالأحرى يقيس مؤشرًا آخر. في حالة ترمومتر المستقيم، فإن المؤشر الذي يُقاس هو طول الزئبق

في الأنبوبة الزجاجية. وفي أنواع أخرى من الترمومترات تقاس مؤشرات أخرى. ففي ترمومترات المقاومة يتم قياس المقاومة الكهربية للترمومتر بصفتها المؤشر الذي يُقاس. وفي الترمومترات الحرارية الكهربية، يكون المؤشر الذي يقاس هو الجهد الحراري الكهربي، بينما في ترمومتر الأفران يكون شكل الملف الذي يلتصق بالمؤشر هو المؤشر الذي يتغير. وتقريبًا يمكن استخدام أي نوع من الأنظمة كترمومتر، لكن في كل الأحوال لا بد أن يرتبط المؤشر الذي يُقاس بالفعل بمؤشر درجة الحرارة في سلوك رياضي محدد. وتسمى هذه العلاقة الرياضية «بمعادلة الحالة» Equation of state للنظام. (في هذه الحالة، الترمومتر هو النظام.) ويعني ذلك ببساطة أنه إذا تغيرت بعض مؤشرات النظام، فإن المؤشرات الأخرى لا بد أن تتغير، ويمكن حساب التغيرات باستخدام معادلة الحالة. وتمثل القراءة الرقمية أو مقياس القراءة للترمومتر نتيجة حل معادلة الحالة للترمومتر. وتحدد معالة الحالة للنظام المستخدم كترمومتر مقياس درجة الحرارة لهذا الترمومتر. وعندما تقرأ الأم الترمومتر، فإنها في الحقيقة تقوم بحل معادلة الحالة للترمومتر.

لكل نظام معادلة الحالة الخاصة به. فمثلًا غاز الهليوم تحت ضغوط متوسطة ودرجات حرارة ليست منخفضة جدًّا له معادلة الحالة الآتية التي تربط ثلاثة من عوامله (ثوابته أو مؤشراته): $PV = RT$ حيث P تمثل الضغط، وV الحجم، وT درجة الحرارة (باستخدام المقياس الديناميكي الحراري أو درجة الحرارة المطلقة، التي سنعرفها فيما بعد)، وR ثابت التناسب. وتسمى غالبًا معادلة الحالة هذه بالقانون العام للغازات، أو قانون الغازات المثالية، وهو علاقة رياضية بين المؤشرات الثلاثة المشار إليها. وفي كل الأوقات، ودون النظر إلى الحالة التي فيها غاز الهليوم، فإن المؤشرات الثلاثة — درجة الحرارة والضغط والحجم — لا بد أن تحقق المعادلة (من الممكن كذلك تعيين محتوى الطاقة U، والإنتروبيا S، للنظام بمجرد معرفة معادلة حالته.) ويمكن رسم معادلة الحالة للنظام على شكل رسم بياني لاثنين من المؤشرات إذا ظل الثالث ثابتًا. ويبين شكل ١–٥ منحنيات الضغط مقابل الحجم لغاز الهليوم في درجات حرارة مختلفة.

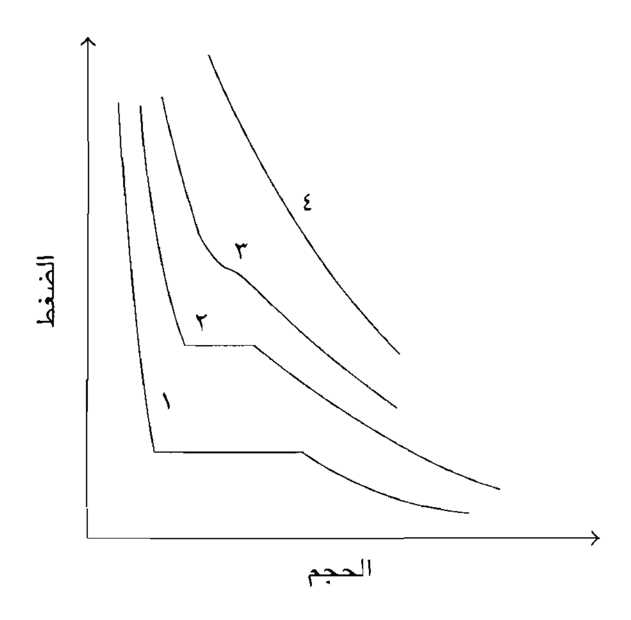
ومعادلة الحالة والمنحنيات الناتجة نسبيًّا بسيطة لأن الهليوم غاز في كل درجات الحرارة ما عدا أكثرها انخفاضًا. أما معادلة الحالة والمنحنيات الناتجة للضغط مقابل الحجم للماء فهي أكثر تعقيدًا بكثير، لأن الماء يمكن أن يتواجد على شكل جامد وسائل أو غاز، وذلك اعتمادًا على درجة الحرارة والضغط. ويبين الشكل ٥–١ بعض المنحنيات للماء.



شكل ٥-١: معادلة الحالة لغاز الهليوم. كل منحنى يمثل أيزوثرم (منحنى درجة حرارة ثابتة)، يبين كيف يتغير الضغط والحجم بينما تظل درجة الحرارة ثابتة. المنحنيات ١ و٢ و٣ و٤ هي على الترتيب درجات حرارة أعلى.

ويمكن استخدام كل من الهليوم والماء كترمومترات، وفي الحقيقة يستخدم الهليوم أحيانًا كترمومتر في القياسات العلمية عند درجات الحرارة المنخفضة جدًّا، وفيما عدا هذه الأغراض الخاصة، فإن الهليوم، مع ذلك، ليس مادة عملية من أجل الترمومترات. والماء مفيد في تحديد نقاط معينة على مقاييس درجة الحرارة، وعدا ذلك فهو الآخر ليس مادة عملية من أجل الترمومترات. وعندما يكون ضغط البارومتر ٧٦٠ مم (٣٢ بوصة)، يتجمد الماء في درجة صفر سلزية (٣٢ فهرنهايت) ويغلي في ١٠٠ سلزية (٢١٢ فهرنهايت). وسنناقش مقاييس درجة الحرارة فيما بعد في فقرة متأخرة من هذا الفصل.

ومبدئيًّا من الممكن قياس درجة حرارة النظام حتى قبل أن يصل الترمومتر إلى الاتزان الحراري. إذا تداخل نظامان حراريًّا في درجتي حرارة مختلفتين معًا، فإن الحرارة ستسري من النظام ذي درجة الحرارة الأعلى (الأسخن) إلى النظام ذي درجة الحرارة الأدنى (الأبرد). وتستطيع الأم بذلك أن تعرف أن ابنها مريض بالحمى وذلك بالإحساس بجبهته. فإذا كان الطفل يعاني من الحمى، فإن جبهته ستكون ساخنة عند لمسها، أي أن الحرارة ستسري من جبهة الطفل إلى يد الأم. أما إذا كانت حرارة الطفل أقل من المعدل الطبيعي فإن جبهته ستكون باردة وستسري



شكل ٥-٢: معادلة الحالة للماء. كل منحنى أيزوثرم يبين كيف يتغير الضغط والحجم بينما تظل درجة الحرارة ثابتة. المنحنيات ١ و٢ و٣ و٤ على الترتيب لدرجات حرارة أعلى. الأجزاء المسطحة (الأفقية) على المنحنيين ١ و٢ تغطي المدى من الحجوم الذي بالنسبة له يكون جزء من الماء سائلًا وجزء غازًا. والماء سائل تمامًا إلى يسار الأجزاء المسطحة (الأفقية)، وغاز تمامًا إلى يمينها. ومنحنى ٣ عند درجة (٣٧٤ سلزية) التي فيها يستحيل معرفة الفرق بين السائل والغاز، بينما عند درجات حرارة أعلى لا يوجد الماء إلا على شكل غاز.

الحراة من يد الأم إلى جبهة الطفل. وهذه الحقيقة بالذات، التي تنص على أن الفرق في درجة الحرارة هو الذي يسبب سريان الحرارة، لها مغزى كبير في إدراك مفهوم الإنتروبيا، وكيف تتحول الطاقة الحرارية إلى صور أخرى للطاقة. وفوق ذلك، فإن هذه الحقيقة نفسها تكمن وراء التعريف الصحيح لمقياس درجة الحرارة الديناميكي الحراري (ويسمى أحيانًا المطلق).

السريان الطبيعي للحرارة

يعرف كل واحد أن الحرارة تسري من الأجسام الأسخن إلى الأجسام الأبرد. فإذا أسقط مكعب من الثلج في فنجان من الشاي الساخن، فسيصبح المكعب أدفأ، وينصهر إلى ماء، والماء الناتج عنه سيكون أدفأ لكن الشاي سيبرد. «تسري» الحرارة خارجة من الشاي الساخن إلى مكعب الثلج البارد. وكما ناقشنا بالفعل في فصل ٤، كان من السهل تفسير ذلك بواسطة النظرية السعرية على أنه يرجع إلى السريان «أسفل

التل». وطبعًا النظرية السعرية على خطأ، ولذا ليس من الممكن التفسير ببساطة لماذا تسري الحرارة من الأجسام ذات درجة الحرارة الأعلى إلى الأجسام ذات درجة الحرارة الأدنى وليس العكس. وبمدلول التمييز بين الحرارة ودرجة الحرارة الذي تعرضنا له سابقًا، فإن الطاقة تسري من التركيز الأعلى (درجة الحرارة الأعلى) إلى التركيز الأقل (درجة حرارة منخفضة)، وبعبارة أخرى «تنتشر» الطاقة بذاتها. وحقيقة الاتجاه الواحد للسريان هو جوهر القانون الثاني للديناميكا الحرارية. ومثل قوانين الحركة لنيوتن أو قانون الحفاظ على الطاقة، فإن هذا القانون مقبول على أنه افتراض أساسي. وهناك طرق مختلفة لمنطوق القانون الثاني، يمكن إثبات أنها كلها متكافئة.

وبمدلول السريان الطبيعي للحرارة، ينص القانون الثاني للديناميكا الحرارية على: «في نظام معزول، لا توجد طريقة لعكس اتجاه سريان الحرارة من درجة الحرارة الأعلى إلى درجة الحرارة الأدنى.» وبعبارة أخرى لا يمكن للحرارة أن تسري «أعلى التل» عمومًا. وكلمة عمومًا «هامة جدًّا». وطبعًا من الممكن إجبار الحرارة على الصعود أعلى التل باستخدام مضخة للحرارة، تمامًا مثل الماء الذي يجبر على الصعود باستخدام مضخة للماء. والثلاجة العادية وجهاز تكييف الهواء أمثله على مضخات الحرارة، ومع ذلك، إذا كانت ثلاجة تعمل في أحد أجزاء النظام المعزول فإن المزيد من الحرارة سيسري «أسفل التل» أو أبعد من «أسفل التل» بحيث يكون محصلة التأثير في النظام هو سريان الحرارة «أسفل التل». وعلى العموم، إذا لم يكن النظام معزولًا، فإن نظامًا ثانيًا قد يتداخل معها بالشكل الذي يجعل الحرارة تسري «أعلى التل» في النظام الأول، ولكن سيكون هناك على الأقل سريان «أسفل التل» يعوض ذلك في النظام الثاني.

وعلى الرغم من أن القانون الثاني للديناميكا الحرارية كما هو مكتوب سابقًا يبدو واضحًا وقليل الشأن، فإنه يؤدي في النهاية إلى أن الحرارة صورة من صور الطاقة وغير قابلة للتحول كلية إلى الصور الأخرى. وهناك طرق أخرى لصياغة القانون الثاني للديناميكا الحرارية، تستعرض كيف أن الأمر أساسًا أن نفهم طبيعة العالم الفيزيائي. والقليل من هذه الطرق نناقشه فيما يلي.

تحويل الطاقة الحرارية إلى صور أخرى من الطاقة

قبل الاعتراف بالحرارة كصورة من صور الطاقة، كان معروفًا أن الحرارة والحركة كانتا مرتبطتين معًا بشكل ما. فالاحتكاك الذي كان غالبًا مرافقًا للحركة كان ينتج

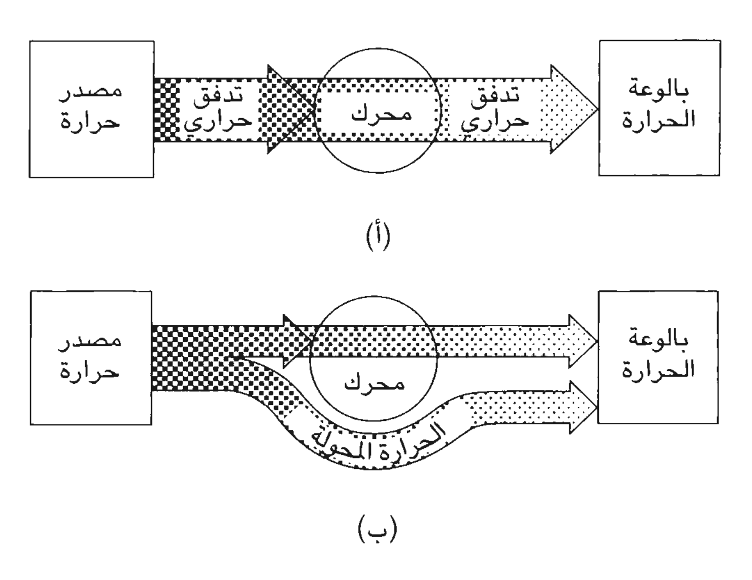
عنه توليد حرارة. وتستخدم الآلات البخارية التي تتطلب حرارة لتوليد الحركة. وبحلول منتصف القرن التاسع عشر كان قد تم الاعتراف بالآلة البخارية كمحول للطاقة، نظام يستخدم لتحويل أو نقل الطاقة الحرارية إلى بعض صور الطاقة الميكانيكية — الشغل، وطاقة الوضع، وطاقة الحركة — أو إلى الطاقة الكهربية أو الكيميائية، وغيرها.

وكما ناقشنا في الفصل السابق، حتى قبل أن نفهم الطبيعة الحقيقية للحرارة على أنها صورة من صور الطاقة، أيقن كارنوت أن الآلة البخارية كانت فقط مثالًا واحدًا للآلات الحرارية. والمثال الآخر الشائع على الآلة الحرارية هو آلة الجازولين الحديثة المستخدمة في السيارات. كما أيقن كارنوت أن مبدأ العمل الأساسي الشائع لكل الآلات الحرارية كان هو سريان الحرارة من خلالها. وقد أشار إلى أن النتيجة الأساسية لكل تحسينات وات كانت سريانا أكثر للحرارة خلال الآلة.

وكما لاحظنا بالفعل في فصل ٤، كون كارنوت صورة ذهنية للآلة الحرارية على أنها مثل الدولاب المائي، لأن المائع السعري لا بد أن يسري خلالها من درجة حرارة عالية (تسمى مصدر الحرارة) إلى درجة حرارة منخفضة تسمى (بالوعة الحرارة). وبروح أفلاطون، وفي جهده للوصول إلى «الواقع الحقيقي» كون كارنوت صورة ذهنية لآلة حرارية مثالية، لا يعيق عملها عوامل مثل الاحتكاك أو الفقد الحراري غير الضروري. لذلك اعتبر أن هذه الآلة المثالية لا بد أن تكون انعكاسية (أي تستطيع دفع المائع أعلى التل) وأنها لا بد أن تدور ببطء شديد. (وهنا كان يفعل الشيء نفسه مثل جاليليو، الذي استخدم في دراسته لحركة السقوط مستويات مائلة وكرات تتدحرج ليبطئ من التأثير ويتخلص من الاحتكاك وتأثيرات المقاومة.)

كان المبدأ الذي تعمل وفقًا له الآلة هو سريان الحرارة خلال الآلة لتجعلها تدور، وكأن ضروريًّا أن تسري كل الحرارة المتاحة من خلال الآلة. وقد بينا ذلك بالرسم في شكل ٥-٣. وفي شكل ٥-٣(أ) تسري كل الحرارة من مصدر الحرارة خلال الآلة. وفي شكل ٥-٣(ب) تحول بعض الحرارة من المصدر لتعبر بجوار الآلة، وتذهب مباشرة إلى بالوعة الحرارة، وبذلك «تفقد».

تتبع كارنوت بالتفصيل التشابه بين الآلة البخارية والدولاب المائي أو الطاحونة المائية التي يسري الماء من خلالها، مسببًا دوران العمود، وبذلك تعمل الماكينة المرتبطة به. وفي الحقيقة، ولأن النظرية السعرية كانت تعتبر أن المائع الحراري يسري من درجة الحرارة العالية إلى درجة الحرارة المنخفضة تمامًا مثل سريان



شكل ٥-٣: تمثيل تخطيطي لسريان الحرارة في آلة حرارية. (أ) كل الحرارة من المصدر تمر خلال الآلة. (ب) بعض الحرارة من المصدر تمر بجوار الآلة.

الماء من المستويات الأعلى إلى المستويات الأدنى، فقد كأن التشبيه قريبًا جدًّا. ويمكن اعتبار الآلة الحرارية دولابًا حراريًّا (عجلة حرارية)، يمكن تصميمها مثل الدولاب المائي. (قام والد كارنوت بعمل الكثير من المقترحات لتحسين عمل الدولاب المائي، وكان كارنوت متأثرًا بذلك.)

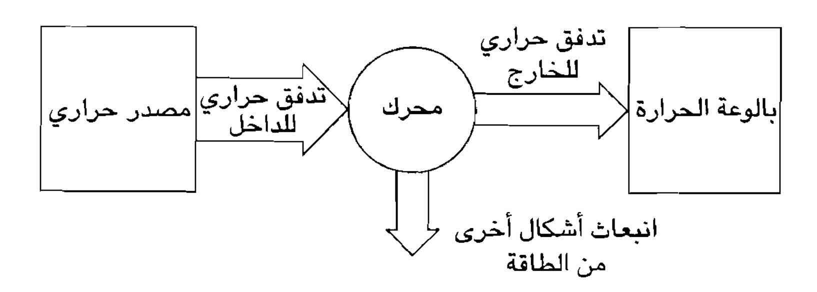
كانت الدواليب المائية تعمل بفضل سقوط الماء من مستوى مرتفع إلى مستوى منخفض، وكذلك كانت تعمل الدواليب الحرارية بفضل جعل الحرارة تسري من درجات الحرارة المرتفعة إلى درجات الحرارة المنخفضة. ولا بد من تصميم الدولاب المائي الفعال بحيث يستغل ميزة كل الارتفاع الذي يسقط منه الماء، ويستفيد من كل الماء الذي يمر عبر المساقط. وبالمثل فإن الدولاب الحراري لا بد أن يستفيد من ميزة كل الفرق بين درجتي الحرارة في المصدر الحراري وفي البالوعة الحرارية، وأن كل الحرارة لا بد أن تمر عبر الدولاب.

ويتطلب ذلك بصورة نموذجية أن تحقق الآلة الحرارية عددًا من الشروط: (١) تؤخذ الحرارة بواسطة الآلة عندما تكون الآلة فقط في درجة حرارة المستودع العالية. (٢) لا بد أن تكون الآلة معزولة جيدًا أثناء تغير درجة حرارتها من الأعلى إلى الأدنى، حتى لا يتسرب جزء من الحرارة إلى الخارج (ينحرف) وتفقد قوتها

الدافعة. (٣) لا بد من تصريف الحرارة في درجة الحرارة المنخفضة في المستودع الحراري — البالوعة الحرارية حتى (٤) لا تحمل أي حرارة «أعلى التل».

توصل كارنوت إلى أن الكفاءة (الكفاءة النسبية للآلة في التزويد بالحركة أو الشغل) في آلته الحرارية المثالية لا بد أن تعتمد على الفرق في درجة حرارة المستودعين، ولا تعتمد على ما إذا كانت الآلة بخارية أم نوعًا آخر. وكان كارنوت يعتبر أن الآلة الحرارية قد تعمل مستخدمة بعض «المواد الأخرى للعمل» غير الماء، المستخدم في الآلة البخارية. وقد توصل مع ذلك إلى أنه لأسباب عملية فإن الآلة البخارية ربما تكون هي الأفضل عمليًّا في بناء كل محطات توليد الكهرباء التي تعتمد على الحرارة (وقود الفحم أو البترول أو الوقود النووي) وتستخدم الماء كمادة الشغل.

وحوالي سنة ١٨٥٠ أقر الفيزيائي الإنجليزي لورد كلفن (راجع فصل ٤) والفيزيائي الألماني رودلف كلاوزيوس بأن أفكار كارنوت الأساسية كانت صحيحة. ومع ذلك احتاجت النظرية إلى مراجعة للأخذ في الحسبان القانون الأول للديناميكا الحرارية (مبدأ الحفاظ على الطاقة)، الذي كان يعني أن الحرارة ليست مائعًا غير قابل للتدمير ولكنها ببساطة صورة من صور الطاقة. وعلى الرغم من أن الحرارة لا بد أن تسري خلال الآلة، فإن التشابه مع الدولاب المائي لا بد من التخلص منه، لأن بعض هذه الحرارة، على عكس الماء، «تتحطم». (يمكن الإبقاء على التشابه مع الدولاب المائي إذا اخترعنا «مائعًا» آخر ليسري خلال الآلة، كما سنناقش ذلك فيما بعد. والمفاهيم القديمة مثل الشهداء، لا تموت أبدًا وإنما تتلاشى ذكراها.) وكمية الحرارة التي تتسرب خارج الآلة إلى المستودع ذي درجة الحرارة المنخفضة، أقل من كمية الحرارة التي تسري خلال الآلة من المصدر ذي درجة الحرارة العالية، ويتحول الفرق إلى شغل أو طاقة ميكانيكية. وبعبارة أخرى، عندما تسري كمية معينة من الطاقة الحرارية في الآلة من المصدر ذي درجة الحرارة العالية، فإن جزءًا منها يذهب إلى الخارج على شكل صورة أخرى من الطاقة بينما يسري الباقي كطاقة حرارية متسربًا إلى المستودع ذي درجة الحرارة المنخفضة. ولا بد من إخراج كل الطاقة التي تتلقاها الآلة؛ لأن الآلة بعد إتمامها دورة كاملة لا بد أن تتواجد في الحالة الديناميكية الحرارية نفسها. ولا بد أن يكون مؤشر طاقتها الداخلية U هو نفسه كما كان في بداية الدورة. ولذا وتبعًا للقانون الأول للديناميكا الحرارية، فإن كل الطاقة التي أخذتها الآلة (في صورة حرارة من المصدر عالي درجة الحرارة) لا بد من إخراجها

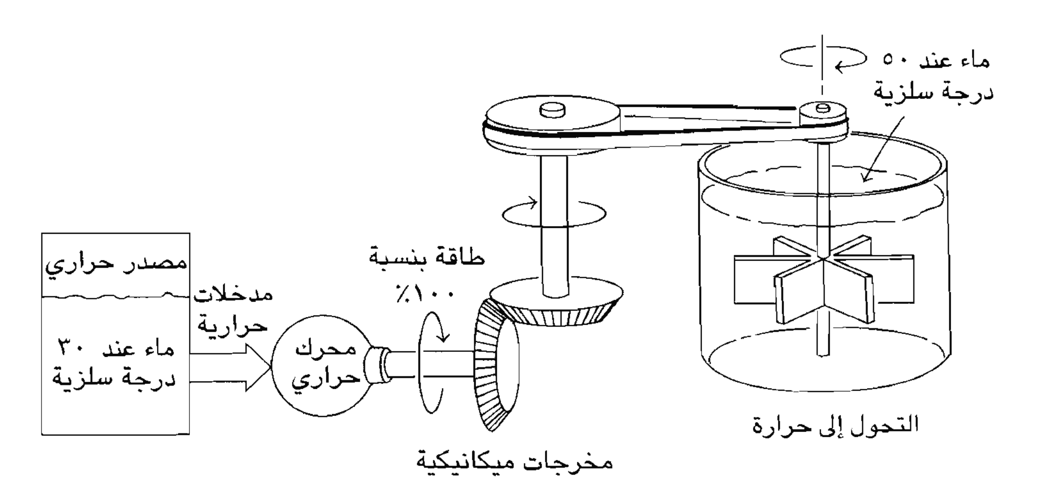


شكل ٥-٤: سريان الطاقة لآلة حرارية. الطاقة الداخلة على شكل حرارة، الطاقة الخارجة على شكل حرارة وشغل أو أي شكل مفيد من الطاقة.

(على صورة شغل أو صور أخرى من الطاقة وكحرارة تذهب إلى المستودع منخفض درجة الحرارة) وقد بينا ذلك في الرسم التخطيطي لسريان الطاقة في شكل ٥-٤.

كان التصحيح الأساسي لأفكار كارنوت، تبعًا لكلاوزيوس يكمن في حقيقة أنه على الأقل لا بد أن يمر عبر الآلة ويخرج، وهذا الجزء الذي يخرج لا يمكن تحويله بواسطة الآلة إلى صورة أخرى للطاقة. وبعبارة أخرى، ليس من الممكن تحويل الحرارة كلية إلى صورة أخرى من الطاقة بواسطة آلة تعمل في دورات. ولعمل ذلك لا بد من انتهاك القانون الثاني للديناميكا الحرارية، الذي ينص على أن الحرارة لا يمكن أن تسري «أعلى التل» في نظام معزول. ويبين الشكل ٥-٥ ما يمكن أن يحدث إذا تمكنت آلة من تحويل الحرارة كلية إلى طاقة ميكانيكية.

افترض أن مثل هذه الآلة «تدار» بالحرارة المأخوذة من مستودع للحرارة في درجة ٣٠ سلزية (٨٦ فهرنهايت). والافتراض هو أن الآلة تأخذ الحرارة من المصدر وتحولها كاملة إلى طاقة ميكانيكية. ويمكن تحويل هذه الطاقة الميكانيكية كلها إلى حرارة مرة أخرى، كما تمكن جول من إظهار ذلك بواسطة عجلة ذات ألواح في تجربته. وبالتحديد يمكن استخدام الطاقة الميكانيكية لتحريك إناء مملوء بالماء في درجة حرارة ٥٠ سلزية (١٢٢ فهرنهايت)، وأنها تتحول إلى حرارة في درجة ٥٠ سلزية. لكن الطاقة الميكانيكية كانت أصلًا طاقة حرارية في درجة ٣٠ في مستودع (مصدر)، وبذلك فالنتيجة المحصلة لكل ذلك لا بد أن تكون نقل الحرارة من مستودع درجة حرارته ٣٠ إلى مستودع آخر درجة حرارته ٥٠ بدون أي تغيرات أخرى، لأن الآلة التي تعمل في دورات تعود إلى حالتها الأصلية. و«القوة الدافعة» لكل العملية كانت هي الحرارة في المستودع عند ٣٠. وتكون الحرارة قد «سرت أعلى التل» بذاتها — وهو مستحيل تبعًا للقانون الثاني للديناميكا الحرارية.



شكل ٥-٥: رسم تخطيطي لآلة مستحيلة. تؤخذ الحرارة من جسم كبير من الماء في درجة ٣٠ سلزية وتتحول كلها إلى طاقة ميكانيكية. تتحول الطاقة الميكانيكية عندئذ إلى حرارة بواسطة تحريك مستودع مملوء بالماء في درجة ٥٠ سلزية، مع النتيجة الكلية أن الحرارة قد سرت «أعلى التل».

والخلل في هذه العملية هو افتراض التحول الكامل للحرارة إلى طاقة ميكانيكية. فلا بد أن يتحرك جزء من الحرارة «أسفل التل» دون تحول ليجعل من الممكن تحويل أي جزء من الحرارة إلى طاقة ميكانيكية تتحول إلى طاقة حرارية في درجة حرارة أعلى من المستودع الذي أخذت منه في الأصل. والعملية الكلية بذلك هي تحرك الحرارة «أسفل التل». والأمثلة النوعية على تغيرات الإنتروبيا التي سنناقشها فيما يلي ستبين كيف يمكن حساب هذه الحركة الشاملة أسفل التل.

وفي بعض الأحيان يرد نص القانون الثاني للديناميكا الحرارية بالتحديد بمدلول هذه التحديدات على قابلية تحول الحرارة إلى صورة أخرى للطاقة. وكما بينًّا حالًا، أن مثل هذه المقولات مكافئة للنص الأصلي بمدلول الانعكاس في سريان الحرارة:

(١) من المستحيل إيجاد آلة حرارية تعمل في دورات وتنقل الحرارة من مستودع (مصدر) دون أن تطلق حرارة إلى مستودع (بالوعة) ذات درجة حرارة أقل.

(٢) من المستحيل إيجاد آلة حرارية تعمل في دورات تؤدي إلى تحول كامل (٪١٠٠) للحرارة إلى شغل.

وعندما تتحرر الطاقة في صورة حرارة عند درجة حرارة معينة (باحتراق الفحم أو البترول أو التفاعلات النووية)، فإن بعض الحرارة لا بد في النهاية أن ينطلق إلى مستودع ذي درجة حرارة أقل.

ويسمى أي انتهاك للقانون الثاني للديناميكا الحرارية «الحركة الأبدية من النوع الثاني». وإذا كان من الممكن بناء ماكينة للحركة الأبدية من النوع الثاني فإن بعض النتائج المربحة يمكن الحصول عليها.

فمثلًا يمكن لسفينة من عابرات المحيط أن تأخذ الماء من سطح المحيط، وتستخلص منه الحرارة، وتستخدم تلك الحرارة لإدارة آلات السفينة. وستكون النتيجة أن الماء المأخوذ سيتحول إلى ثلج، وستتحرك السفينة إلى الأمام وسيلقى بالثلج في المحيط، وستأخذ السفينة مزيدًا من الماء، وتستمر العملية وبذلك لن تحتاج السفينة إلى أي فحم أو بترول أو طاقة نووية لعملياتها. وسيكون الناتج الثانوي المباشر لتشغيل السفينة هو الثلج، بالإضافة إلى الأملاح والمعادن التي كانت ذائبة في الماء، والتي ستتبلر من مياه المحيط أثناء عملية استخلاص الحرارة. وسيعاد كل ذلك إلى المحيط مع ظهور النتيجة النهائية الوحيدة وهي أن سطح المحيط سيبرد قليلًا جدًّا، وفي الأساس بشكل غير محسوس.

ومن الممكن إعطاء مثال مذهل أكثر: تخيل محطات توليد للكهرباء موجودة على ضفاف الأنهار المتنوعة الملوثة في العالم: كوياهوجا Cuyahoga في أوهايو Ohio، وفستولا Vistula في بولندا، وإلب Elbe في ألمانيا وتشيكوسلوفاكيا،* والجانج Gangs في الهند، وأشباهها. تأخذ هذه المحطات مياه النهر الملوثة وتستخلص منها الحرارة لتحولها إلى طاقة كهربية، وبذلك تخفض درجة حرارة المياه تحت درجة التجمد. وتؤدي عملية التجمد إلى الفصل الجزئي للملوثات من المياه. يسمح بعد ذلك للمياه الأنظف المتجمدة بالانصهار والعودة إلى النهر، أما الملوثات التي فصلت فيمكن استخدامها في الصناعة أو الزراعة أو دفنها ببساطة. وستكون نتيجة كل ذلك تحسين واضح للبيئة كناتج ثانوي لتوليد الكهرباء.

ولن يعمل أي من هذه المحطات لأنه، على الرغم من أنها تستطيع أخذ الحرارة من المستودعات الحرارية، إلا أنها لا تخرج أي حرارة إلى مستودع حراري ذي درجة

*أصبحتا جمهوريتين: التشيك وسلوفاكيا. (المترجمان)

حرارة أقل، لتؤكد على متطلبات سريان الحرارة «أسفل التل». وللأسف، يقوم القانون الثاني للديناميكا الحرارية بتعقيد الحل في مسائل البيئة والطاقة.

كفاءة الآلات الحرارية

كفاءة أي آلة هي ببساطة ناتج قسمة الطاقة المفيدة أو الشغل الخارج من الآلة على الطاقة الداخلة إلى الآلة لتجعلها تعمل. وفي آلة حرارية، قد يتم حرق الفحم أو البترول أو الغاز لتوليد الطاقة الداخلة في شكل حرارة. ويسمى ذلك Q_H. افترض أنه في حالة معينة أُطلق ٥٠٠٠٠ كيلو سعر (وحدة شائعة للحرارة) بواسطة احتراق الوقود لتكون Q_H. افترض أنه من هذه الكمية تم تحويل ١٠٠٠٠ كيلو سعر إلى كهرباء. ولنسمِ ذلك W، لترمز إلى الشغل. (وفي المناقشة التالية نستخدم كلمة «شغل» لأي صورة من الطاقة غير الحرارة. وكما أشرنا بالفعل، فإن الشغل قابل للتحول كلية إلى أي صورة من صور الطاقة في غياب الاحتكاك.) وكسر الكفاءة هو: $W/Q_H = 10000/50000 = 1/5 = 20\%$ ولأن ١٠٠٠٠ كيلو سعر فقط هي التي تحولت إلى كهرباء، فإن ٤٠٠٠ كيلو سعر (الباقية) خرجت إلى المستودع ذي درجة الحرارة الأقل ولنسمي ذلك Q_C.

وبنفس القدر يمكن حساب كسر الكفاءة من $1 - Q_C/Q_H$ وفي المثال الذي لدينا، $1 - Q_C/Q_H = 1 - 40000/50000 = 1 - 0.8 = 0.2 = 20\%$ وهذه العلاقة صحيحة لأي آلة حرارية، سواء أكانت مثالية أم لا. كانت كفاءة آلة نيوتن الكبرى حوالي ٠,٥ بالمائة وكفاءة آلة وات المحسنة حوالي ٣ أو ٤ بالمائة. أما كفاءة الآلات الحرارية في المحطات الحديثة لتوليد الكهرباء فهي عادة ٤٠ بالمائة. ويورد جدول ٥-١ كفاءات الأنماط المختلفة للآلات. ودرجات الحرارة الواردة بمقياس كلفن، الذي سنناقشه في الفقرة التالية.

والقانون الثاني للديناميكا الحرارية كما سبق ينص على أنه حتى أفضل ما يمكن تخيله من آلات — الآلة الحرارية المثالية — لا يمكن أن تكون كفاءتها ١٠٠ بالمائة. كم قد تبلغ كفاءة هذه الآلة، ولماذا هي ليست كاملة الكفاءة؟ وهذه أسئلة عملية هامة لأن الآلة الحرارية المثالية تشكل معيارًا تقاس عليه الآلات العملية الأخرى. فإذا اقتربت آلة معينة من الكفاءة المثالية، فسيعرف من بناها أنه لا يمكن تحسينها برفع كفاءتها أكثر من ذلك، ومن ناحية أخرى، إذا كانت كفاءة الآلة نصف أو أقل

جدول ٥-١: كفاءات بعض الآلات الحرارية.

طراز الآلة	درجة حرارة المستودع الساخن (كلفن)	درجة حرارة المستودع البارد (كلفن)	الكفاءة (بالمائة)
آلة نيوتن	٣٧٣	٣٠٠	١/٢
آلة وات	٣٨٥	٣٠٠	٣-٤
	١٥٠٠	٣٠٠	٨٠
كارنوت المثالية	١٠٠٠	٣٠٠	٧٠
	٨١١	٣١١	٦٢
رانكين	٨١١	٣١١	٥٠
مصنع قوى بخارية توربيني	٨١١	٣١١	٤٠
موتور بخاري ثنائي الدورة	٨١١	٣١١	٥٧
آلة جازولين ذات كفاءة كارنوت	١٩٤٤	٢٨٩	٨٥
آلة جازولين مثالية	١٩٤٤	٢٨٩	٥٨
آلة جازولين واقعية	—	—	٣٠
آلة ديزل واقعية	—	—	٤٠

من نصف الكفاءة المثالية، فربما يمكن تحسينها بشكل ملموس. وتسمى الكفاءة المثالية أحيانًا، بكفاءة كارنوت أو الكفاءة الديناميكية الحرارية.

وعلى الرغم من أن كارنوت استخدم النظرية السعرية الخاطئة، فإن الآلة الحرارية المثالية تسمى آلة كارنوت، وتسمى الدورة بدورة كارنوت لآلة تعمل بين مستودعين للحرارة. والصفات الأساسية لهذه الدورة مبينة في شكل ٥-٦ التخطيطي، الذي يبين كذلك كيف تضمن المؤشرات الديناميكية الحرارية في عمل الآلة. وتمثل النار والثلج في الشكل مصدر الحرارة وبالوعة الحرارة.

الخطوة (١) أخذ الحرارة أيزوثرميًّا

(أيزوثرمي تعني في درجة حرارة ثابتة.) الآلة عند درجة حرارة T_H في المستودع الساخن، وتأخذ الحرارة ببطء بينما تظل درجة حرارتها ثابتة. ولعمل ذلك لا بد من تغيير مؤشر آخر في نظام الآلة، ونتيجة لذلك فإن الآلة قد تقوم ببعض الشغل المفيد. (في شكل ٥-٦(أ) يندفع المكبس إلى الخارج، فيزيد حجم الأسطوانة.)

الخطوة (٢) إنجاز شغل بواسطة الآلة أدياباتيكيًّا

(أدياباتيكي تعني أنه لا تدخل أو تخرج حرارة.) تُعزل الآلة عزلًا حراريًّا تامًّا عن مستودعي الحرارة وعن بقية العالم، وتعمل بعض الشغل المفيد. وعمل شغل يعني أن الطاقة (وليست الحرارة) تغادر الآلة، ولذلك فإن محتوى الطاقة الداخلية للآلة يصبح أقل في نهاية هذه الخطوة عن البداية. وبسبب معادلة الحالة للمادة التي تقوم بالعمل، تنخفض درجة حرارة الآلة. تتوقف هذه العملية عندما تصل درجة حرارة الآلة T_C إلى درجة حرارة المستودع البارد. (في الشكل ٥-٦(ب) ما زال المكبس يتحرك إلى الخارج.)

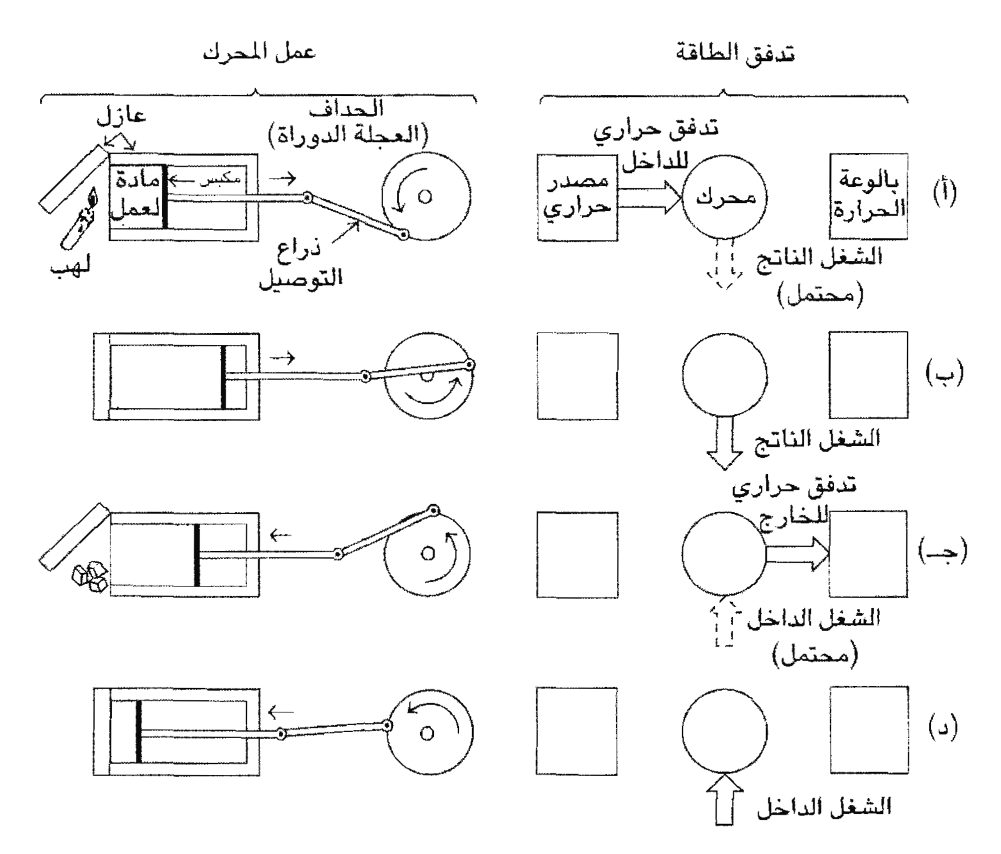
الخطوة (٣) التخلص من الحرارة أيزوثرميًّا

الآلة موجودة الآن في درجة حرارة T_C في المستودع البارد، ويزال العازل الحراري، وتسري الحرارة ببطء إلى المستودع ذي درجة الحرارة المنخفضة بينما تظل درجة حرارة الآلة ثابتة. ومرة أخرى، من أجل عمل ذلك، لا بد أن يتغير مؤشر آخر للآلة نتيجة الشغل الذي بُذل على الآلة. وفي هذه الخطوة وفي الخطوة التالية لا بد أن يرجع بعض الشغل الذي قامت به الآلة إليها. وهاتان الخطوتان، اللتان تقومان بوظيفة مكثف وات، وهما ضروريتان للآلة التي تعمل في دورات، يمكن اعتبار أنهما الخطوتان اللتان عندهما تقوم الطبيعة بتخفيض الكفاءة عن ١٠٠٪ إلى القيمة الديناميكية الحرارية. (في شكل ٥-٦(جـ) يتحرك المكبس الآن إلى الداخل بواسطة العجلة الطائرة (الحداف) والعمود الذي يربطهما فيضغط حجم الأسطوانة.)

الخطوة (٤) زيادة درجة حرارة الآلة أدياباتيكيا

يتم عزل الآلة حراريًّا مرة ثانية عن مستودعات الحرارة وعن بقية العالم. ويبذل شغل على الآلة، عادة بتغيير أحد مؤشراتها، مما ينتج عنه زيادة في درجة حرارتها حتى تعود إلى درجة حرارة البداية، T_H، درجة حرارة المستودع الساخن. ويصبح محتوى الطاقة الداخلية للآلة الآن هو نفسه الذي كان في البداية في الخطوة ١. وتصبح الآلة مستعدة لتكرار الدورة. (في الشكل ٥-٦ يستمر المكبس في حركته إلى الداخل.)

ومن المثير أنه قد يكون هناك أجزاء من دورة الآلة يحدث فيها تحول للحرارة ١٠٠٪ إلى شغل. فالخطوة ١ في دورة كارنوت المبينة في شكل ٥-٦(أ) تمثل هذا



شكل ٥-٦: دورة كارنوت وما يصاحبها من سريان للطاقة. يبين الجزء إلى اليسار من الشكل سريان الطاقة المرافق للأشكال إلى اليمين من الشكل. *P*، مكبس، *WS* مادة العمل، *CR* العمود الرابط، *FW* الحداف (العجلة الدوارة)، *Ins* العازل، *Flm* اللهب، *I* الثلج. (أ) أخذ الحرارة أيزوثرميًّا من المستودع، يتحرك المكبس إلى الخارج، وتبذل الآلة شغلًا. (ب) الآلة تبذل شغلًا أدياباتيكيًّا، ويتحرك المكبس إلى الخارج. (جـ) إطلاق الحرارة إلى المستودع أيزوثرميًّا، والمكبس يتحرك إلى الداخل ببذل شغل على الآلة بواسطة الحداف. (د) ارتفاع أدياباتيكي في درجة الحرارة، ويتحرك المكبس إلى الداخل كلما بُذل شغل أكثر على الآلة بواسطة الحداف.

الجزء. ومع ذلك، ومن أجل أن تستمر الآلة في العمل لا بد لها أن تقطع الدورة الكاملة. وأثناء عملية المرور بالدورة الكاملة، يتم تحقيق القانون الثاني للديناميكا الحرارية في الخطوتين ٣ و٤ اللتين تضعان في الآلة جزءًا من الشغل الخارج منها في الخطوتين ١ و٢، الذي يخرج منه جزء إلى المستودع ذي درجة الحرارة المنخفضة (شكل ٥-٦(جـ)) ويستخدم الباقي ليعود بالآلة إلى نقطة البداية في الحلقة (شكل ٥-٦(د)). ويصدق ذلك على جميع الآلات، دون النظر إلى تصحيحاتها أو طريقة عملها.

استنتج كارنوت في الأصل أن كفاءة دورة كارنوت لا بد أن تتناسب مع الفرق المطلق في درجات الحرارة بين المستودعين الساخن والبارد، $T_H - T_C$. وعندما أعاد كلاوزيوس تحليل الدورة ليسمح بالحفاظ على الطاقة بين أنه إذا تم استخدام مقياس درجات الحرارة المناسب (ذلك الذي يسمى مقياس درجة الحرارة المطلقة)، فإن الكفاءة ستساوي الفرق النسبي (بالمائة) بين درجتي الحرارة في المستودعين منسوبًا إلى درجة حرارة المستودع الساخن، أي أن الكفاءة تساوي: $(T_H - T_C)/T_H = 1 - T_C/T_H$.

وباستخدام معادلة كلاوزيوس للكفاءة الديناميكية الحرارية، كفاءة كارنوت، من الممكن حساب الكفاءة التي يمكن توقعها إذا نحينا كل الاحتكاكات أو العمليات الانعكاسية، وكذلك حساب الفقد الحراري في مصنع توليد للكهرباء حديث أو يعمل بدورة كارنوت. وقد أوردنا نتائج مثل هذه الحسابات في الجدول ٥-١، الذي يبين محطات التوليد الواقعية الحديثة وكيف أنها تقترب من كفاءة كارنوت لدرجات الحرارة التي تعمل عندها.

والطريقة الوحيدة لزيادة الكفاءة النظرية الممكنة للآلات هي إما بزيادة T_H أو نقص T_C. وعلى كوكب الأرض لا يمكن خفض T_C تحت ٢٧٣ كلفن (٣٢ فهرنهايت)، لأن تلك هي درجة تجمد الماء، ومحطات القوى الحديثة اليوم تستخدم الماء للتبريد من النهر أو المحيط أو من مستودعاتها ذات درجة الحرارة المنخفضة. ونظريًّا يمكن استخدام مبردات أخرى، لِنَقُل مضاد التجمد (إيثيلين جليكول) كما يستخدم في آلات السيارات، الذي يظل سائلًا في درجات الحرارة الأقل كثيرًا من درجة تجمد الماء. ثم يقوم نظام تبريد بخفض درجة حرارة مضاد التجمد ويكون مستودعًا حراريًّا ذا درجة حرارة منخفضة جدًّا. ومع ذلك فالطاقة مطلوبة لتشغيل نظام التبريد. ويمكن إثبات أن الطاقة اللازمة لتشغيل نظام التبريد، ستأخذ من الطاقة المكتسبة من زيادة الكفاءة الناتجة من خفض T_C. وفي الحقيقة، سيكون محصلة التأثير لإدخال ثلاجة هو خفض الكفاءة الكلية تحت كفاءة كارنوت.

وبالطبع قد يتخيل الإنسان بناء محطة توليد كهرباء فوق قمر صناعي يدور حول الأرض في الفضاء الخارجي، حيث T_C هي بضعة درجات مطلقة. سيكون عندئذ من الضروري معرفة كيف تنقل الكهرباء المتولدة إلى الأرض.

وكبديل، من الضروري الأخذ في الاعتبار رفع درجة الحرارة T_H للمستودع الساخن. ولا يمكن أن تكون درجة الحرارة تلك أعلى من درجة انصهار المادة المصنوعة منها الآلة الحرارية. وفي الواقع لا بد أن تكون T_H أقل بوضوح من درجة

الانصهار لأن معظم المواد تصبح ضعيفة بالقرب من درجة انصهارها. فإذا كانت T_H حوالي ١٥٠٠ كلفن، ودرجة انصهار الصلب ١٧٠٠ كلفن، وكانت T_C ٣٠٠ كلفن، فإن كفاءة كارنوت المحسوبة هي: ١ − ٣٠٠/١٥٠٠ = ٠,٨ = ٨٠٪. وبسبب الحاجة إلى معاملات الأمان (للحفاظ على الغلايات دون أن تتحطم تحت الضغط العالي المصاحب لدرجات الحرارة المرتفعة) فإن T_H يمكن أن تكون حول ١٠٠٠ كلفن بشكل أكثر معقولية، مما يجعل كفاءة كارنوت ٧٠٪. وقد لا تصل الآلة الواقعية إلى أكثر من ثلاثة أرباع كفاءة كارنوت، فتعطي كفاءة قصوى يمكن الحصول عليها في حدود ٥٠–٥٥٪. وبذلك يمكن توقع أن حوالي نصف الوقود المحترق في أفضل الآلات الحرارية الواقعية التي تعمل بين مستودعات حرارة «معقولة» سيفقد، طالما أننا نعني تحوله إلى شغل «مفيد» (راجع البيانات في جدول ٥-١ لأمثلة أكثر تحديدًا).

وحديثًا اقتُرِحت فكرة استخدام آلة حرارية بثلاثة مستودعات للحصول على تحويل أكثر كفاءة للحرارة في درجات الحرارة المرتفعة. يضاف بعض الحرارة إلى النظام عند درجة حرارة متوسطة بين T_H وT_C مثلًا، أثناء الخطوة ٤ التي ذكرناها سابقًا لدورة كارنوت. تساعد هذه الحرارة المضافة في درجة الحرارة المتوسطة في رفع درجة حرارة الآلة ثانية إلى T_H من أجل ألا يبذل شغل كثير على الآلة. وبذلك لن تصبح الخطوة ٤ أديباتيكية. وستكون النتيجة أن الحرارة الداخلة إلى النظام عند T_H قد تحولت بكفاءة أكثر إلى صورة أخرى من صور الطاقة. ومع ذلك، فإن الحرارة المضافة عند درجة حرارة متوسطة قد تحولت بكفاءة أقل. وستكون الكفاءة الكلية أقل من كفاءة كارنوت إذا أخذنا في الحسبان كل مصادر الحرارة. وفي الواقع فإن Q_C الحرارة التي ذهبت إلى المستودع ذي درجة الحرارة الأقل تجيء في معظمها من المستودع ذي درجة الحرارة المتوسطة وليس من المستودع ذي درجة الحرارة العالية. وميزة الفكرة المقترحة أن المستودع ذي درجة الحرارة المتوسطة سيكون مصدرًا للحرارة ولا يتطلب مزيدًا من الوقود ليحرقه، وهذا المصدر قد يكون إما شمسيًّا أو جيوثرميًّا (أرضيًّا حراريًّا) أو مصدرًا آخر للحرارة من درجة أدنى متاح ليس بهدف الحفاظ على الطاقة. (راجع مقالة باول Powell ورفاقه الواردة في مراجع هذا الفصل.)

والأفكار المتضمنة في نظرية الآلة الحرارية تقريبًا عالمية. فالتنوعات الكثيرة للآلة الحرارية يمكن تصنيفها تبعًا لعدة منطلقات. فمثلًا هناك آلات الاحتراق الخارجي (مثل الآلة البخارية الانعكاسية، والتوربينات البخارية، وآلات الهواء الساخن)، وآلات

الاحتراق الداخلي (مثل الأنواع المختلفة لآلات الجازولين والديزل، والآلات النفاثة، وآلات الصواريخ). وأي آلة تتضمن حرق بعض الوقود أو تعتمد على درجة الحرارة في عملها، أو تتضمن أي شكل من أشكال إطلاق أو استخلاص حرارة وتحويلها إلى صورة أخرى من صور الطاقة — هي آلة حرارية. وحتى الغلاف الجوي للأرض آلة حرارية عملاقة تحول الحرارة القادمة من الشمس إلى صور أخرى للطاقة. (طاقة الرياح هي طاقة حركة لحركة منتظمة لجزيئات الهواء، وتحتوي السحب الرعدية على طاقة كهربية.) وتخضع كل الآلات الحرارية للقواعد نفسها فيما يتعلق بالحد الأقصى للكفاءة النظرية، التي تخضع تمامًا لحكم النظرية التي طورها كارنوت وصححها كلاوزيوس. وكما ذكرنا بالفعل، فإن الكفاءة المثالية (كفاءة كارنوت) لكل هذه الآلات تعتمد فقط على درجات الحرارة في المستودعين الحراريين ولا تعتمد على أي شيء آخر أو أي تفاصيل أو سمات في تصميم الآلة.

وفي الحالات المخالفة للأغراض النظرية لا تكون الآلة التي تبنى تحديدًا لتأكيد دورة كارنوت وتكون أقرب ما يمكن إليها عملية دائمًا. وهناك قصة تروى عن آلة سفينة تم بناؤها لتكون كفاءتها قريبة من آلة كارنوت. وعندما وضعت في السفينة التي صممت من أجلها، كانت أثقل من اللازم فغرقت السفينة! (راجع فصل ١٨ من كتاب مورتون موت-سميث Morton Mott-Smith الوارد في المراجع.)

المقياس الديناميكي الحراري أو المطلق لدرجة الحرارة

وصِفَتْ الترمومترات ومقاييسها من قبل بأنها تعتمد على اتزان درجة الحرارة ومعادلة الحالة لنظام الترمومتر. كما تمت الإشارة أيضًا إلى أن مقياس درجة الحرارة يمكن تعريفه بطريقة أخرى بمعلومية انسياب الحرارة بين درجتي حرارة مختلفتين. وتجعل حلقة كارنوت ذلك ممكنًا تمامًا. وبدلًا من استخدام عوامل التغيير الفيزيائية للمادة الترمومترية مثل الزئبق، من الممكن استخدام خواص الحرارة وانتقالها. بمعنى آخر، يمكن استخدام الطاقة «كمادة» ترمومترية.

تخيل جسمين عند درجتي حرارة مختلفتين، ثم تخيل بعد ذلك آلة كارنوت صغيرة تستخدم هذين الجسمين كخزاناتها (مستودعاتها) الحرارية. ووفقًا لنظرية آلة كارنوت، فالنسبة بين الحرارة التي تنساب خارجة من الآلة إلى الحرارة التي تنساب داخلة إلى الآلة Q_C/Q_H يجب أن تعتمد فقط على درجة حرارة الجسمين. وقد اقترح العالم البريطاني لورد كلفن أن درجتي حرارة الجسمين T_H وT_C يجب تعريفهما

على أنهما تتناسبان مع انسياب حرارة كل منهما: أي أن $T_C/T_H = Q_C/Q_H$. وعليه فمقياس درجة الحرارة المحددة يسمى المقياس الديناميكي الحراري، أو مقياس درجة الحرارة المطلقة. فمثلًا: افترض جسمًا معينًا عند درجة حرارة ٥٠٠ مطلقة، وأننا نرغب في معرفة درجة حرارة جسم أبرد منه، فمن الممكن تخيل أن آلة صغيرة لكارنوت توصل بين الجسمين وأن الحرارة المنسابة للداخل Q_H والحرارة الخارجة Q_C يمكن تعيينهما من هذه الآلة. إذا كانت النسبة Q_C/Q_H هي ١/٢ عندئذ ووفقًا لكلفين لا بد لنسبة T_C/T_H أن تكون ١/٢ أيضًا. وهكذا فإن درجة الجسم الأبرد هي نصف درجة الجسم الأسخن أو ١/٢ × ٥٠٠ أي ٢٥٠ درجة مطلقة.

ومقياس درجة الحرارة المطلق المعرف سابقًا هو بمدلول النسب فقط. ولتثبيت المقياس فعليًّا من الضروري أيضًا أن تحدد مقياسًا لوحدات درجات الحرارة (الدرجات). فإذا كانت ستصبح ١٠٠ وحدة بين نقطتي التجمد والغليان للماء (كما هو الحال في المقياس السلزي) فدرجة حرارة تجمد الماء على المقياس المطلق هي ٢٧٣ ودرجة الغليان هي ٣٧٣. ويسمى مقياس درجة الحرارة المطلق هذا مقياس كلفن (الاستخدام الشائع للوحدات في مقياس درجة الحرارة يطلق عليه عادة درجات؛ بناء على اتفاق عالمي، إلا أن الوحدات على مقياس كلفن تسمى كلفينات.) فإذا كانت هناك ١٨٠ درجة بين نقطة تجمد الماء ونقطة غليانه (كما هو الحال في مقياس فهرنهايت) فدرجة حرارة تجمد الماء هي ٤٩١° ودرجة غليانه هي ٦٧١°. ويطلق على هذا المقياس المطلق مقياس رانكين.

القانون الثالث للديناميكا الحرارية

ماذا يحدث إذا كان خزان (مستودع) الحرارة المنخفضة عند الصفر المطلق؟ حيث إن كفاءة الآلة الحرارية تساوي $1 - T_C/T_H$ فعندئذ ستكون كفاءة كارنوت ١٠٠٪.

وعادة لا توجد مثل هذه الخزانات (المستودعات). وكما أشرنا من قبل فإن الطاقة المبذولة لمحاولة جعل الخزان البارد عند درجة حرارة الصفر المطلق قد تكون أكبر من الطاقة المستفادة التي حصلنا عليها عند درجة حرارة الصفر المطلق. إلا أنه قد يكون من المهم أن نرى ما إذا كانت النظرية سارية أم لا، حتى عند درجة الحرارة المنخفضة تلك. وهكذا من الضروري أن نختبر احتمال الحصول على مثل هذا الخزان.

وينتهي الأمر بأنه لتحصل على خزان درجة حرارة منخفضة، ستقل كفاءة الثلاجة المستخدمة للوصول إلى هذه الدرجة المنخفضة كلما انخفضت درجة الحرارة، وتستغرق وقتًا أطول وأطول لتقلل درجة الحرارة كلما اقتربت من الصفر المطلق: ويمكن تلخيص هذه المشاهد في الواقع، في القانون الثالث للديناميكا الحرارية: ليس من الممكن الوصول إلى الصفر المطلق لدرجة الحرارة في عدد محدد من الخطوات. ويعني هذا أنه من الممكن أن تصل قريبًا جدًّا من درجة حرارة الصفر المطلق، لكن ليس من الممكن أبدًا الوصول إليه. وبكلمات أخرى «يمكن الحصول على الصفر المطلق، لكن قد يستغرق ذلك ما لانهاية.»*

يمكن تلخيص القوانين الثلاثة للديناميكا الحرارية في بعض الأحيان بطرافة بمصطلحات المقامرة. بمقارنة الطاقة الحرارية بما لديك من مال تراهن به في ناد للمقامرة، تصبح القوانين عندئذ:

(١) لا تستطيع أن تكسب، ويمكنك أن تنتهي دون خسارة.
(٢) يمكنك فقط أن تنتهي دون خسارة حتى لو لعبت مدة طويلة بما فيه الكفاية وحصلت بالضبط على مجموعة أوراق اللعب الصحيحة.
(٣) يجب أن تعيش طالما أنك تحصل على أوراق اللعب الصحيحة.

تحلل وعدم إتاحة الطاقة والإنتروبيا

على الرغم من أن الطاقة لا تستحدث ولا تفنى لكنها تتحول فقط، فإن مفهوم «فقط» أو «تحلل» الطاقة هو مفهوم مفيد. فإذا كان لدينا آلة طاقة ذات كفاءة ٤٠٪، إذن فإن نسبة ٦٠٪ الأخرى من الحرارة المتولدة أثناء تشغيل الآلة لم تتحول إلى أشكال «مفيدة» لكنها تذهب إلى مستودع درجة الحرارة المنخفض. وفوق ذلك، فهذه الحرارة لن يعاد استخدامها خلال الآلة في محاولة أخرى لتحويلها إلى صورة مفيدة. فأي حرارة تم تفريغها في مستودع الحرارة المنخفضة تصبح مفقودة، ولا تصبح متاحة للتحول إلى أي شكل آخر من أشكال الطاقة (إلا إذا كان هناك مستودع

*من المفضل أن تقول «صفر كلفن» بدلًا من «صفر مطلق»، و«درجة الحرارة الثرموديناميكية» بدلًا من «درجة الحرارة المطلقة»؛ لأن مقياس درجة الحرارة مبني على انسياب الحرارة التي هي عملية ديناميكية. واستخدام مصطلح مثل صفر مطلق يمكن أن يسبب اضطرابًا، لأنه سيظهر في ظروف معينة سؤال يتعلق بدرجة الحررة المطلقة السالبة. راجع فصل ٥ من كتاب Mark Zemansky في قائمة المراجع لهذا الفصل.

ما زالت درجة حرارته أقل ومتاح للاستخدام). يقال هنا إن الطاقة قد تحللت. وبالفعل فأي كمية طاقة على شكل حرارة تتحلل بالمقارنة بنفس الكمية من الطاقة في شكل آخر، لأنها قابلة للتحول بشكل كامل. وهكذا فإن الطاقة عندما تتحول إلى حرارة تصبح متحللة.

وفوق ذلك، إذا انسابت الطاقة وهي في شكل حرارة من مستودع ذي درجة حرارة عالية مباشرة إلى مستودع درجة حرارة أقل فستحلل بنسبة أكبر كثيرًا مما لو انسابت خلال آلة حرارية، حيث سينتقل جزء منها على الأقل إلى شكل آخر ليكون متاحًا لتحولات أخرى. وهاتان هما الخاصيتان اللتان يمكن أن تجعلا طاقة جسم غير متاحة بشكل ما أو أن تتحلل: (١) أن تكون في الشكل الذي يوصف أنه حرارة، و(٢) درجة الحرارة الأقل للجسم الذي طاقة حرارته أقل إتاحة.

ولقد بحث كلاوزيوس، كما ذكر من قبل، في وصف إمكانية إتاحة انتقال محتوى الطاقة لنظام بصياغة كلمة إنتروبيا (Entropy) من الأصول اليونانية تعني محتوى الانتقال، ولقد استخدم الكلمة في الواقع ليصف عدم إمكانية إتاحة طاقة النظام للانتقال ... وهكذا كلما زادت الإنتروبيا قلت إتاحة الطاقة الداخلية للانتقال إذا تم إعداد آلة حرارية داخل النظام.

كان كلاوزيوس متأثرًا بدرجة كبيرة بأفكار كارنوت. وبالرغم من تيقنه من أن مفهوم عدم قابلية مائع الحرارة السعري للتحطيم كان خطأ، فإنه أيضًا كان متيقنًا من أن «مائعًا» مجردًا (أكثر تجريدًا من السعري أو الطاقة)، يمكن أن ينساب في آلة مثالية ولا يتحطم. فالإنتروبيا هي هذا المائع. والإنتروبيا، مثل الطاقة، هي مفهوم نسبي وعليه فالتغيير في الإنتروبيا هو المهم. والأنتروبيا مثل الطاقة لا تتحطم، إلا أنها على خلاف الطاقة، يمكن أن تستحدث، كما سيذكر فيما بعد. ففي تحليل كارنوت الأصلي «لم نفقد» أي حرارة في آلة الحرارة المثالية، بالرغم من أنها يمكن أن تفقد في أي آلة أخرى. وفي تحليل كلاوزيوس المنقح، كما سنرى فيما يلي، لم «تُستحدث» أي إنتروبيا في الآلة المثالية، بالرغم من أنه يمكن أن تُستحدث في أي آلة أخرى.

ويمكن لطبيعة التغيرات الإنتروبية أن توضح بسهولة بأمثلة عددية. في بعض الحالات تقدر التغيرات الإنتروبية لجسم أو لنظام بمدلول كمية الحرارة المضافة إلى الجسم أو النظام أو المأخوذة منه لكل درجة من درجات الحرارة المطلقة. فإذا أضيفت كمية ما من الحرارة إلى جسم كان في البداية في حالة اتزان عند درجة حرارة معينة، فستزداد الإنتروبيا للجسم بقيمة تساوي Q/T — أيْ كمية الحرارة المضافة

Q على درجة الحرارة المطلقة للجسم T. (هذا التعريف للتغير في الإنتروبيا، مثل تعريف طاقة الحركة هي $(1/2)mv^2$، تم وضعه هنا دون أي برهان.) فمثلًا، إذا أضيف لجسم كان في البداية عند درجة حرارة ٣٠٠ كلفن (درجة حرارة الغرفة) ٥٠٠٠ كيلو سعر حراري فإن التغير في الإنتروبيا هو ٣٠٠/٥٠٠٠ = ١٦,٦٧ كيلو سعر لكل كلفن. وعلى الجانب الآخر، إذا فقد جسم عند ٦٠٠ كلفن ٥٠٠ كيلو سعر حراري فالتغير في الإنتروبيا يساوي −٦٠٠/٥٠٠٠ = −٨,٣٠٠ كيلو سعر لكل كلفن. (إذا تغيرت درجة حرارة الجسم فإن التغير في الإنتروبيا يحسب من المساحة الموجودة تحت الرسم البياني للحرارة مع $1/T$.)

يتكون أحد الأنظمة الديناميكية الحرارية من مستودع ساخن عند درجة حرارة T_H ومستودع بارد عند درجة حرارة T_C ويمكن أن تستخدم آلة حرارية كمثال لكيفية حساب الإنتروبيا. وللتحديد، افترض T_H ٦٠٠ كلفن وT_C ٣٠٠ كلفن. إذا انساب ٥٠٠٠ كيلو سعر حراري مباشرة من *المستودع الساخن إلى المستودع البارد*، فهذه الكمية من الحرارة كلها تصبح منعدمة أو غير متاحة للتحول إلى أي صورة أخرى. وبدلًا من ذلك يمكن للكمية ٥٠٠٠ كيلو سعر أن تنساب إلى آلة حرارية بكفاءة ٢٠٪. وبطريقة أخرى يمكن أن تنساب الحرارة خلال آلة كارنوت، التي في هذه الحالة تكون كفاءتها ٥٠٪، ويمكن التحقق من ذلك باستخدام المفاهيم المذكورة سلفًا.

إذا انسابت الحرارة مباشر من المستودع الساخن إلى البارد فإن التغير في الإنتروبيا للمستودع الساخن هو −٦٠٠/٥٠٠٠ = −٨,٣٠٠ كيلو سعر/كلفن (انخفاض) كما حسبناه سابقًا. والتغير في الإنتروبيا (زيادة) في المستودع البارد كما حسبناه سابقًا أيضًا ٣٠٠/٥٠٠٠ = ١٦,٦٧ كيلو سعر/كلفن. وبدمج الاثنين معًا، هناك محصلة زيادة للنظام الكمي هي: ١٦,٦٧ − ٨,٣٣ = ٨,٣٤ كيلو سعر/كلفن. هذا الرقم هو مقياس لحقيقة أن الحرارة قد قلت بالمرور من المستودع ذي درجة الحرارة العالية إلى مستودع درجة الحرارة المنخفضة، أي أن الحرارة قد أصبحت أقل إتاحة للتحول.

ومن جهة أخرى إذا انسابت الحرارة خلال آلة لها كفاءة ٢٠٪، تحول ١٠٠٠ كيلو سعر حرارة إلى شكل آخر من أشكال الطاقة وانتقل ٤٠٠٠ كيلو سعر إلى المستودع البارد. فالزيادة في الإنتروبيا للمستودع البارد تصبح = ١٣,٣٣ كيلو سعر/كلفن. وما زال التغير في الإنتروبيا للمستودع الساخن هو −٨,٣٣ كيلو سعر/كلفن، وعليه فمحصلة التغير في الإنتروبيا للنظام كله ١٣,٣٣ − ٨,٣٣ = ٥ كيلو سعر/كلفن

وهو رقم أقل من السابق وهذا يعني أن كمية أقل من الطاقة الحرارية التي من الممكن أن تتحول قد فقدت.

وفي النهاية، إذا انسابت الحرارة خلال آلة كارنوت ذات كفاءة ٥٠٪، فإن ٢٥٠٠ كيلو سعر تتحول إلى نوع آخر من الطاقة وأن ٢٥٠٠ كيلو سعر ستذهب إلى المستودع الأبرد. الزيادة في إنتروبيا المستودع الأبرد تكون ٢٥٠٠/٣٠٠ = ٨,٣٣ كيلو سعر/كلفن. وما زال تغير إنتروبيا المستودع الساخن كما هي وتصبح محصلة التغير في الإنتروبيا للنظام الكلي ٨,٣٣ − ٨,٣٣ = ٠. وبمعنى آخر، فبالنسبة لآلة كارنوت، كل الطاقة المتاحة للتحول تحول إلى شكل آخر من أشكال الطاقة بدلًا من حرارة، وما زالت متاحة لتحولات أخرى. وهكذا فإن الإنتروبيا في هذه الحالة للنظام (المستودعين) قد تغيرت. وحتى في حالة كارنوت، «فُقِد» جزء من الطاقة لأنه انتقل إلى المستودع الأبرد، لكن من المهم تقبل أن تلك الطاقة أصبحت غير متاحة للتحول لأنها سبق وأن تحولت إلى حرارة داخل النظام المعزول. ففي أي حالة عندما تكون الطاقة في صورة حرارة، نحن نعرف أن جزءًا منها غير متاح للتحول وأنه في صورة مستهلكة. وإذا انتقلت الحرارة خلال آلة كارنوت فقط فسيتم الاحتفاظ بها من أن تتهالك أكثر في العمليات المتعاقبة. ويجب ملاحظة أنه في عينة حساب الإنتروبيا المذكور سابقًا، فإن إنتروبيا النظام الكلي إما تزيد أو لا تتغير. والسؤال الذي قد يثار هو هل يمكن أن يحدث أي تغير في النظام ككل تنخفض فيه محصلة الإنتروبيا. وفي الحالة المذكورة سابقًا بالتحديد، يستلزم الأمر أن تكون الزيادة في إنتروبيا المستودع البارد أقل من ٨,٣٣ كيلو سعر/كلفن. وهذا يعني كمية أقل من ٢٥٠٠ كيلو سعر تنساب من الآلة، ومن ثم حرارة أكثر تتحول إلى صورة أخرى من الطاقة في آلة كارنوت، أكثر مما يسمح بها القانون الثاني للديناميكا الحرارية. لكن القانون الثاني لا يمكن انتهاكه. وإليك صورة أخرى للقانون الثاني للديناميكا الحرارية: إنتروبيا أي نظام معزول لا يمكن أبدًا أن تقل، إنها يمكن فقط أن تزيد أو تظل دون تغير. يمكن لهذه المقولة أن تتعارض مع القانون الأول للديناميكا الحرارية: طاقة أي نظام معزول لا بد أن تظل دون تغيير — إنها لا تستطيع أن تزيد أو تقل. ومن جهة أخرى فإن الإنتروبيا، قد تزيد: الإنتروبيا «شبه محافظ عليها». ويمكننا القانون الأول للديناميكا الحرارية من أن نعرف الطاقة الداخلية للنظام، والقانون الثاني يمكننا من تعريف إنتروبيا النظام.

يمكن النظر إلى الإنتروبيا على أنها مادة لها بعض الخواص التي تعزى إلى السعرية: يمكن أن «تنساب» من درجة حرارة عالية إلى درجة حرارة منخفضة،

وتنساب بصفة خاصة من مصدر للحرارة خلال آلة كارنوت إلى حوض للحرارة مسببة دوران عجلة حرارية، وتقدم شغلًا. وعندما يصبح النظام في عملية انعكاسية فإن الإنتروبيا الكلية للنظام تظل ثابتة. أما في العملية غير الانعكاسية فإن بعض الإنتروبيا الإضافية يستحدث (بدلًا من أن يفقد، كما هو الحال في السعرية). ويبدو أن مفهوم كلاوزيوس الأولي عن الإنتروبيا كان من هذا المنطلق. إلا أنه أصبح الأكثر فائدة أن نفكر في الإنتروبيا على أنها عامل متغير في النظام.

أينما يتحول شكل من أشكال الطاقة في نظام ما إلى حرارة، فإن إنتروبيا النظام تزداد. ففي تجربة عجلة التجريف لجول، تبدأ الأوزان الساقطة بطاقة الوضع مقدرة بكتلتها وارتفاعها عن سطح الأرض. وأثناء تساقطها تتحول طاقة وضعها الميكانيكية إلى «حرارة» تضاف إلى الماء. فالطاقة الكلية للنظام المكون من الماء والأوزان ما زالت ثابتة، إلا أن إنتروبيا الماء زادت (محسوبة بنفس الطريقة السابقة)، بينما ظلت إنتروبيا الأوزان دون أن تتغير (لم تضف إليها حرارة أو تؤخذ منها.) ونتيجة لذلك تحدث زيادة في محصلة الإنتروبيا للنظام الكلي بسبب تحول طاقة الوضع الميكانيكية إلى طاقة حرارة.

تبين أمثلة حسابات الإنتروبيا المذكورة سابقًا وأمثلة أخرى مثلها أنه من الممكن استخدام القيم العددية لإنتروبيا الأنظمة المختلفة لتشخيص الوسائل التي توزع بها الطاقة خلال الأنظمة رياضيًّا. فانسياب الحرارة من جزء ساخن من نظام إلى جزء بارد من نظام هو إعادة توزيع لطاقة النظام، ونتيجة لذلك فإن إنتروبيا النظام تزداد. وطبيعي أنه بمرور الوقت يصل النظام كله إلى اتزان حراري عند درجة حرارة منتظمة. في تلك الحالة تزداد إنتروبيا النظام بزيادة انسياب الحرارة، فتصل إلى نقطة عالية. ولأن كل أجزاء النظام الآن عند درجة حرارة متساوية، فلن يحدث انسياب آخر للحرارة، وهكذا يقال عندئذ إن إنتروبيا النظام قد وصلت «النهاية العظمى» عندما يكون النظام في حالة اتزان حراري.

ومن الممكن إحداث اضطراب لهذا الاتزان بتحويل جزء من طاقة النظام إلى حرارة إضافية (مثلًا، جزء من الفحم أو الزيت في النظام يمكن إشعاله وحرقه). الطاقة الكيمائية للفحم أو الزيت هي الآن على شكل طاقة حركة جزيئات، ومن ثم أقل إتاحة للتحول إلى شكل آخر من أشكال الطاقة. وتصبح الطاقة الحرارية «الجديدة» تلك جاهزة لتنتشر في أجزاء أخرى من النظام. وكما ناقشنا من قبل، فإذا انسابت من خلال آلة كارنوت فلن يكون هناك زيادة إنتروبيا أكثر من ذلك، إلا

أنه إذا انسابت خلال أي آلة أخرى أو مباشرة إلى أجزاء أخرى من النظام، فستزداد الإنتروبيا إلى قيمة عظمى جديدة.

زيادة الإنتروبيا واللاانعكاسية

إذا أجريت عملية ما وأحدثت زيادة في إنتروبيا نظام معزول فإن القانون الثاني للديناميكا الحرارية ينص على أن تلك العملية لا يمكن أن تُعكس طالما ظل النظام معزولًا، لأن مثل هذه الانعكاسية قد تخفض الإنتروبيا (عن قيمتها الجديدة) وهذا غير جائز. فبمجرد أن احترق الفحم، منتجًا حرارة ورمادًا، فلن نستطيع إرجاع العملية لتجعل الحرارة تنساب ثانية إلى الرماد والرماد يصبح فحمًا مرة ثانية. ويمكن لأي عملية أن تصبح عكسية فقط إذا كان التغير في الإنتروبيا المصاحب صفرًا.

فآلة كارنوت هي انعكاسية تمامًا لأن التغير الكلي للإنتروبيا المصاحب لعمليتها هو صفر. وأي آلة بها قيمة من الاحتكاك (ومن ثم تحول طاقة ميكانيكية إلى حرارة) تحمل معها عملية لانعكاسية. وحتى لو كانت الآلة ليس بها احتكاك لكنها لا تعمل بحلقة كارنوت فالعملية هنا لانعكاسية لأن التغير الكلي لإنتروبيا نظام المستودعات علاوة على الآلة سيكون أكبر من صفر. وقد تكون الآلة نفسها انعكاسية* وهذا يتوقف على ما إذا كان بها احتكاك أم لا، لكن بالرغم من ذلك فالعلمية بالنسبة للنظام الكلي هي تغير لانعكاسي. وكما ذكرنا من قبل، هذا التغير اللاانعكاسي يرتبط مع أسلوب التعامل مع الاتزان الحراري للمستودعين.

وهكذا في هذا الأمر، فمبدأ زيادة الإنتروبيا «يرشد النظام المعزول إلى الطريق الذي يسلكه.» يستطيع أي نظام أن يسير فقط في العمليات التي لا تخفض من الإنتروبيا. أشار أحد العلماء البريطانيين إلى الإنتروبيا على أنها «سهم الزمن» لأن الأوصاف التي تمت عند أزمنة مختلفة لنظام منعزل يمكن أن توضع في التعاقب الزمني المناسب بترتيبها حسب دورها في زيادة الإنتروبيا.

*من حيث المبدأ يمكن أن تعمل أي آلة بطريقة انعكاسية، أو تعمل «للخلف» بإمدادها بشغل يجعلها تأخذ حرارة من مستودع منخفض درجة الحرارة وتحويلها إلى حرارة، علاوة على مكافئ الحرارة للشغل المبذول، إلى مستودع درجة الحرارة الأعلى. آلة الحرارة الانعكاسية تسمى مضخة حرارة. أمثلة المضخات الحرارية هي أجهزة التكييف والثلاجات التي تعمل على تبريد المباني والغذاء على الترتيب. وتستخدم أيضًا مضخات الحرارة لتسخين المباني، وآلة كارنوت التي تعمل «للخلف» آلة مثالية لمضخة حرارة. ووفقًا للقانون الثاني للديناميكا الحرارية فإن عملية مضخة الحرارة في نظام منعزل لا يمكن أن تنتج أبدًا نقصًا في إنتروبيا النظام ككل.

الإنتروبيا كمؤشر للنظام

إذا كان هناك نظام غير معزول ويمكن أن يتعامل معه نظام آخر، فربما يكتسب أو يفقد طاقة. فإذا كانت هذه الطاقة على شكل حرارة فمن الممكن أن نحسب التغير في إنتروبيا النظام مباشرة من الحرارة المكتسبة أو المفقودة، مفترضين إمكانية حساب درجة حرارة النظام أثناء اكتساب أو فقد الحرارة. ويمكن عمل ذلك باستخدام القانون الأول للديناميكا الحرارية كمعادلة بجانب معادلة الحالة للنظام. وتُظهر التحليلات الرياضية أن إنتروبيا أي نظام يمكن أن تُعامل كعامل فيزيائي يحدد النظام بقدر حالة النظام، تمامًا مثلما درجة الحرارة والطاقة الداخلية هما أيضًا عوامل فيزيائية لتحديد حالة النظام. ويمكن حساب قيمة الإنتروبيا من درجة الحرارة وعوامل النظام الأخرى، مثل: الحجم والضغط والجهد الكهربي أو محتوى الطاقة الداخلي. وكل نظام له إنتروبيا وبالرغم من عدم وجود «مقياس للإنتروبيا» لقياس إنتروبيا النظام، فإن الإنتروبيا يمكن حسابها (أو بطريقة مكافئة يطلع عليها في الجدول) إذا كانت العوامل الأخرى مثل درجة الحرارة والحجم والكتلة قيمًا معروفة. وبالمثل، إذا لم يكن هناك «مقياس لدرجة الحرارة» (ترمومترات) فمن الممكن حساب درجة الحرارة كهدف من عوامل النظام الأخرى.

وتمامًا كما في حالة درجة الحرارة والضغط والعوامل الميكروسكوبية الأخرى التي هي عوامل تصف الخواص المجمعة أو مجمل النظام، وفي النهاية «تُفسر» بمدلولات نموذج ميكروسكوبي (النظرية الجزيئية للحركة) التي تعتبر المادة مكونة من ذرات وجزيئات في حالات مختلفة من الحركة؛ فإن الإنتروبيا بالمثل والقانون الثاني للديناميكا الحرارية يمكن أن «تُفسَّر» بمدلولات النظرية الجزيئية لحركة المادة.

الاحتمالية والتفسير الميكروسكوبي للإنتروبيا

كما خمن كل من فرانسيس بيكون وروبرت هوك وإسحاق نيوتن في أزمنة مبكرة، فإن تأثير انتقال الحرارة إلى الغاز هو زيادة الحركة العشوائية الميكروسكوبية للجزيئات ولكن دون حركة الكتلة. وحتى «الهواء الساكن» فإن كل جزيئاته تتحرك، لكنها تغير اتجاهاتها باستمرار (وإلا فإن الهواء سيكون له حركة كتلة جماعية — سيكون هناك ريح أو نسيم.) ويمكن أن نبين أن درجة حرارة الغاز المطلقة تتناسب مع متوسط طاقة الحركة الانتقالية العشوائية لكل جزيء غاز.

من المهم أن نجعل الأمر واضحًا وأن نميز بين الحركة العشوائية والحركة المنتظمة. فإذا تحركت قذيفة خلال الفضاء بسرعة مئات الأميال في الساعة، متوسط سرعة جزيئاتها كلها متساوٍ وفي نفس الاتجاه؛ فسيقال عن حركتها تلك إنها منتظمة. عندما يكون للقذيفة تصادم أديباتيكي (لا فقد للحرارة) مع جسم آخر يوقفها، فالجزيئات لها نفس متوسط طاقة الحركة كما كان من قبل ولكن الحركة أصبحت الآن ميكروسكوبية وعشوائية تمامًا. ولم تعد الجزيئات الآن تذهب كلها في نفس الاتجاه أو أنها ستتحرك بعيدًا في اتجاه واحد، وعليه فإن محصلة متوسط سرعتها تكون صفرًا (وهذا يناقض سرعتها). فطاقة حركة القذيفة، التي حسبت سابقًا من الحركة الكلية المجمعة، قد تحولت إلى حرارة وأضيفت إلى الحركات العشوائية الميكروسكوبية للجزيئات، والنتيجة أن درجة حرارة القذيفة قد زادت.

ويعني استخدام تعبير مثل «متوسط طاقة الحركة الانتقالية العشوائية لكل جزيء» أن بعض الجزيئات تتحرك أسرع وبعضها أبطأ من المتوسط، وهناك بعض الأشكال الأخرى من طاقة الحركة، مثل الانقلاب والالتواء الاهتزاز للأجزاء المختلفة للجزيئات. وفي الواقع قد يتحرك أي جزيء أسرع من المتوسط في وقت ما أو أبطأ من المتوسط في وقت آخر، وقد يسأل المرء أي نسبة من الجزيئات تتحرك أسرع من المتوسط (أو أبطأ)، وأي نسبة تتحرك أسرع كثيرًا من المتوسط، وهكذا. ويطلق على الرسم البياني الذي يجيب على هذه الأسئلة وأسئلة أخرى مماثلة: دالة التوزيع، أو دالة التجزيء؛ لأنه يظهر كيف أن طاقة الحركة الكلية لغاز تتوزع أو تتقاسم بين الجزيئات المختلفة.

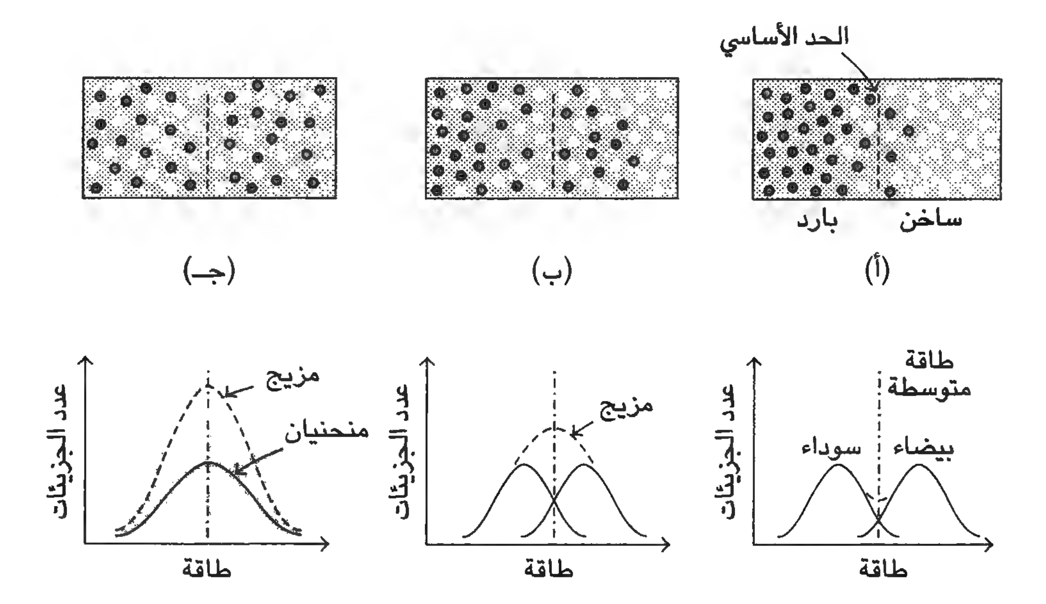
من حيث المبدأ، يجب أن يكون ممكنًا حساب دالة التوزيع تلك من المبادئ الأساسية للميكانيكا الناتجة من أفكار إسحاق نيوتن ومعاصريه وأتباعه، لكن هذه الحسابات ستكون صعبه ومعقدة جدًّا؛ بسبب وجود العدد الهائل من الجزيئات في بوصة واحدة مكعبة من الغاز (حوالي ٢٠٠ مليون مليون مليون، أو ٢ × ١٠^٢٠، وباستخدام «مفهوم علمي» عند درجة حرارة وضغط عادي ربما يتطلب الأمر عددًا مساويًا من المعادلات لحلها. وأكثر من ذلك، قد يكون من الصعب جدًّا عمل قياسات لتحديد الظروف البدائية للموقع والسرعة لكل جزيء مطلوب لعمل الحسابات. وأفضل الطرق وأقربها هي محاولة إجراء حسابات إحصائية — أي عمل اقتراحات عن أين تكون الجزيئات «مثالية»، وبأي سرعة تتحرك. ومن الضروري استخدام أفكار من الاحتمالات والفرص في هذه الافتراضات. ونتيجة مثل هذه الافتراضات سيكون

حيودات عشوائية لجزيئات انفرادية معينة بعيدًا عن السرعة والاتجاه «المثاليين» للجزيئات.

ويتلخص المعنى الأساسي للعشوائية في مدلولات، مثل: «غير قابل للتنبؤ» أو «مجهول» أو «وفقًا للفرصة». إلا أنه، بالرغم من أن حركة جزيئات انفرادية معينة قد تكون غير قابلة للتنبؤ، فإن متوسط حركة الجزء «المثالي» يمكن التنبؤ به. ويمكن للمرء في الواقع، أن يتنبأ ماذا يفعل جزيء منفرد معين (بالرغم من أن ذلك باحتمالية) وعليه فإن عينة إحصائية كافية من الجزيئات، مثل عدد معين، ستتصرف غالبًا وفقًا للتوقعات.

لكن ذلك يمثل مشكلة، كيف يمكن وجود نتائج غير متوقعة إذا كان كل شيء مبنيًّا على ميكانيكا نيوتن، التي تفترض التأكيد؟ من الضروري القيام بوضع فرضيات أو افتراضات أخرى على المتوسطات الناتجة مستخدمين الاحتمالات نفسها، مثل القيم التي يمكن الحصول عليها بإجراء الحسابات بقوانين نيوتن ثم نأخذ متوسطها. ويسمى هذا الافتراض فرضية الاحتمالات المتضمنة ergodic، وبمزجها مع قوانين ميكانيكا نيوتن عندئذ سيؤدي ذلك إلى أن دالة التوزيع على مدى فترة من الزمن ستصبح في حالة مطابقة لاحتمال توزيع عشوائي حول طاقة حركة متوسطة.

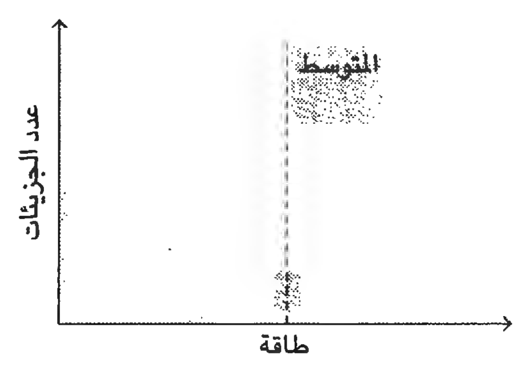
يمكن استخدام النموذج الميكروسكوبي وفكرة الدوال التوزيعية «لتفسير» لماذا تنساب الحرارة من درجات الحرارة العالية إلى درجات الحرارة المنخفضة. وهذا موضح بصفة خاصة بمثال خلط غاز ساخن مع غاز بارد، وينتج عن ذلك انتقال حرارة الغاز الساخن إلى الغاز البارد، ومن ثم الحصول على اتزان درجة حرارة الخليط. يبين شكل ٥-٧ تمثيلًا توضيحيًّا لوعاء يحتوي على جزيئات غاز ساخن (درجة حرارة عالية) في الجهة اليمنى وجزيئات غاز بارد (درجة حرارة منخفضة) في الجهة اليسرى. في البداية كان الفاصل بين نصفي الوعاء مجهزًا بحاجز أديباتيكي (منعزل تمامًا)، ثم يرفع هذا الحاجز كلية، وعليه فالجزيئات ستصبح حرة في العبور بين نصفي الوعاء. حتى بالرغم من أن الجزيئات «الساخنة» لن تنتقل مسافة كبيرة في الفترات بين التصادمات فإنها ستتفاعل مع الجزيئات «الباردة» الأقرب إليها بتصادمها معها، ونتيجة لذلك فالجزيئات «الباردة» أو الجزيئات بطيئة الحركة ستكتسب طاقة من التصادمات، حتى إذا دُفعت ثانية إلى مكانها في نصف الوعاء الذي أتت منه، عندئذ يمكنها أن تصطدم بجزيئات أخرى أبرد منها و«تتقاسم» معها الطاقة التي اكتسبتها من الجزيئات الأخرى. وستنتشر في نفس الوقت بعض



شكل ٥-٧: خلط غاز ساخن وغاز بارد. بداية جزيئات سوداء كلها على اليسار، وعند درجة حرارة أقل من الجزيئات البيضاء، التي كانت في البداية كلها على الجانب الأيمن. (أ) التوزيع في البداية بعد إزالة الحاجز الأديباتيكي مباشرة. (ب) عملية الخلط شبه مكتملة. أصبح توزيع الطاقة متشابه بشكل أكبر. (جـ) عملية الخلط تامة. توزيع الطاقة بين مجموعتين من الجزيئات الآن متطابقة ومندمجة في توزيع متزن في كل الوعاء. يمثل المنحنى المتصل في الأشكال توزيع الطاقة للجزيئات البيضاء والجزيئات السوداء، والمنحنيات المتقطعة هي مجموع المنحنيات، وتمثل توزيع الطاقة لكل الجزيئات.

الجزيئات الباردة إلى النصف الأيمن من الوعاء رافعة متوسط طاقتها أثناء اصطدامها أو تداخلها مع الجزيئات الساخنة. وبالمثل، ستنتشر بعض الجزيئات الساخنة إلى النصف الأيسر من الوعاء، فاقدة طاقة أثناء اصطدامها أو تداخلها مع الجزيئات الباردة. وبمرور الوقت قد تتداخل كل الجزيئات الساخنة مباشرة أو من خلال سلسلة من التصادمات مع الجزيئات الباردة، وبالمثل ستتداخل كل الجزيئات الباردة مع الجزيئات الساخنة.

وباستمرار هذه العملية ستتحرك الدالتان (دالتا توزيع الطاقة) اللتان كانتا متمايزتين إحداهما في اتجاه الأخرى، وتصبحان متماثلتين كما في الشكل ٥-٧. وفي النهاية تصبحان متطابقتين في الأساس: أي أن دالتي التوزيع ستصبحان واحدة. وسيصبح متوسط طاقة الحركة الانتقالية لكل جزيء (مؤشرًا على درجة الحرارة المطلقة) مساويًا للمتوسط (محسوبًا وفقًا للعدد النسبي للجزيئات الأصلية الساخنة



شكل ٥-٨: توزيع غير جائز للطاقة.

والباردة) للمتوسطين الأصليين، لكن سيكون التوزيع عشوائيًّا لكل الجزيئات حول المتوسط الجديد. ودالة التوزيع الجديدة هي دالة التوزيع الاتزاني، أي: إذا لم يحدث أي اضطراب آخر للنظام فالتوزيع لن يتغير.

والأكثر من ذلك أن التوزيع الاتزاني هو التوزيع الأكثر احتمالًا بالمفهوم التالي: من الممكن أن نتصور طرقًا عديدة يكون فيها محتوى طاقة كلي لنظام ما قد يتقاسم بين جزيئات النظام المختلفة. فمثلًا، بعد اختلاط كل الجزيئات، قد يكون لدى نصف الجزيئات طاقة أكثر من المتوسط بمقدار ١٠٪ بالضبط، ولدى النصف الآخر طاقة أقل بنسبة ١٠٪ بالضبط عن المتوسط. ودالة توزيع مثل هذه ممثلة في الشكل ٥-٨. واحتمال حدوث مثل هذه الدالة في التوزيع ضئيل جدًّا. والأمر المتوقع حدوثه بصورة أكبر أن دالة التوزيع ستكون عشوائية حول القيمة المتوسطة، لأن هناك طرقًا كثيرة لكون النظام عشوائيًّا (غير قابل للاحتمال) أكثر من أن يكون زيادة ١٠٪ أو أقل ١٠٪ عن المتوسط. (هناك حالات تكون فيها قيمة المتوسط للتوزيع العشوائي غير مساوية للقيمة الأكثر احتمالًا — راجع مثلًا، شكل ٧-١٥(ب) — لكن يمكن اعتبارها تنقيحًا للمناقشة السابقة.)

ويشبه ذلك تمامًا المقامرة بزهر النرد. إذا رميت الزهرين عددًا من المرات تجد أن متوسط قيمة مجموع الزهرين مساويًا للعدد ٧، وأن القيمة الأكثر احتمالًا هي أيضًا ٧. والاحتمال الأكثر حدوثًا التالي هو ٨ و٦ بينما أقل القيم المحتملة هي ٢ و١٢. يحدث ذلك لأنك تلاحظ من الجدول ٥-٢ أن هناك ستة طرق مختلفة للوصول إلى رقم ٧ وخمس طرق مختلفة للوصول إلى رقمي ٦ و٨، لكنّ هناك طريقتين فقط للحصول على ٢ أو ١٢. والمقامر الناجح الذي يستخدم زهرًا غير مغشوشة يعلم ذلك تمامًا.

وحيث إن التوزيع المتزن (الاتزاني) هو واحد من الاحتمالات الأعظم في الصورة الميكروسكوبية، وإن القانون الثاني للديناميكا الحرارية يؤدي إلى أن الإنتروبيا تكون عند نهايتها العظمى عند الاتزان؛ فمن المناسب أن نفترض وجود علاقة بين إنتروبيا النظام واحتمالية توزع طاقته الخاصة. (من المحتمل أن يظهر أن لوغاريتم توزيع طاقة معينة لنظام ما يسلك مثل إنتروبيا النظام رياضيًّا). وفي الواقع الصورة الميكروسكوبية المصحوبة بإدخال مفاهيم الاحتمالية تجعل الإنتروبيا فكرة قوية جدًّا. فنستطيع أن نفسر مثلًا، لماذا لا تجتمع كل الجزيئات في جانب واحد من الوعاء: إنه أمر بسيط فالاحتمال الأكبر للجزيئات هو أن تنتشر في كل الوعاء؛ لأن هناك أكثر من طريقة تستطيع بها الجزيئات أن تنتشر في كل الوعاء أكثر من الطرق التي يمكن بها أن تنتشر على جانب حائط واحد. فمثلًا لكي تتراكم الجزيئات على طول حائط واحد فالتصادم بينها لا بد له أن يرتطم بالجزيئات في اتجاه ذلك الحائط. وواضح أن هذا أمر مستبعد، فالتصادم، أو فرصة ارتطام الجزيئات مع بعضها في كل الاتجاهات، له نفس الفرصة، وبذلك تملأ الوعاء ككل. ولذلك فإن الإنتروبيا تكون أكبر عندما تكون الجزيئات منتشرة، حالة الاتزان. وبالمثل إذا وُجد نوعان من الغاز في وعاء، فمن المرجح أكثر أنهما سيختلطان عشوائيًّا أكثر من انفصالها في طبقتين (ذلك بافتراض طبعًا أن قوى الجاذبية ليست كبيرة إلى درجة أن يصبح الاختلاف في وزن جزيئات الغاز له أهمية).

الإنتروبيا والترتيب: شيطان ماكسويل

إذا ألقى عدد من الشاحنات قوالب الطوب في أحد المواقع، فالاحتمال الأقوى أنها ستسقط على شكل كومة غير مرتبة. ومن المستبعد جدًّا أن تسقط لتكون تركيبًا منتظمًا على شكل بناية مثلًا. ذلك لأن طرق تكون كومة غير منتظمة من قوالب الطوب أكثر من الطرق التي تكون بها بناية. وبمعنى آخر، فالتنظيم غير المرتب يكون أكثر احتمالًا. (بالمثل احتمال أن تكون حجرة معيشة أي شخص غير منتظمة أكبر؛ لأن هناك طرقًا أكثر لأن يكون الإنسان مهملًا من أن يكون مرتبًا.)

وبالعودة إلى نظرية الحركة الجزيئية للمادة، عندما تكون مادة مثل الماء في الحالة الجامدة (ثلج)، فإن جزيئاتها تكون مرتبة منظمة في نسق هندسي منتظم محدد جدًّا. وعند إضافة الحرارة إلى الجامد تزداد الإنتروبيا. وبالرغم من أن الجزيئات تحافظ في الغالب على نفس النسق كما في الماضي فإنها تتحرك أكثر عند أي لحظة

جدول ٥-٢: الطرق التي تلقي بها زهر النرد ليعطي مجموعًا معينًا.

مجموع الزهرين	التكوينات التي تعطي المجموع						عدد الطرق
٢	١،١						١
٣	٢،١	١،٢					٢
٤	٣،١	٢،٢	١،٣				٣
٥	٤،١	٣،٢	٢،٣	١،٤			٤
٦	٥،١	٤،٢	٣،٣	٢،٤	١،٥		٥
٧	٦،١	٥،٢	٤،٣	٣،٤	٢،٥	١،٦	٦
٨	٦،٢	٥،٣	٤،٤	٣،٥	٢،٦		٥
٩	٦،٣	٥،٤	٤،٥	٣،٦			٤
١٠	٦،٤	٥،٥	٤،٦				٣
١١	٦،٥	٥،٦					٢
١٢	٦،٦						١

من الزمن. فزيادة الإنتروبيا إذن توصف بأنها زيادة في عدم الترتيب على المستوى الجزيئي. وعندما ينصهر الثلج فإن جزيئات المادة تزيد من الحركة، وينهار بالفعل النسق الهندسي المنتظم السابق كلية تقريبًا، ويزداد عدم انتظام النظام والإنتروبيا أكثر كثيرًا. وما زالت، في المتوسط، الجزيئات قريبة من بعضها تقريبًا مثلما كانت من قبل. وبإضافة مزيد من الحرارة وارتفاع درجة الحرارة أكثر (أعلى) كثيرًا من درجة الانصهار، تزداد المسافة المتوسطة بين الجزيئات ويزداد مدى قيم كمية الحركة للجزيئات. وعندما يتبخر الماء، تصبح الجزيئات منفصلة تمامًا، وتزداد قيمة كمية الحركة أكثر وأكثر. والجزيئات الآن في وضع غير منتظم جدًّا وتصبح إنتروبيا النظام أكبر كثيرًا. وتحسب زيادة الإنتروبيا كنتيجة للتبخر بقسمة الحرارة الكامنة على درجة الحرارة الثرموديناميكية (راجع الفصل الرابع).

تتضمن أفكار الترتيب وعدم الترتيب (أو التنظيم وعدم وجوده) ليس فقط ترتيب الجزيئات في الفراغ بل أيضًا دالات توزيع الطاقة. ويمكن أيضًا وصف خلط الجزيئات الساخنة والباردة الذي نوقش سابقًا في إطار منهج الاتزان على أنه فقدان للتنظيم في توزيعات الطاقة. ففي البداية، كان نصف الجزيئات متجمعًا في توزيع ذي درجة حرارة منخفضة (طاقة أقل لكل جزيء)، والنصف الآخر في توزيع بأعلى متوسط درجة حرارة. ويمثل ذلك تجمعًا أو ترتيبًا متميزًا للجزيئات، ذوات الطاقة

المنخفضة، وذوات الطاقة العالية. وبعد اختلاطهما والوصول إلى الاتزان يصبح هناك توزيع واحد، ولم يعد هناك بعد ترتيب أو عزل مكاني وفقًا للطاقة.

وخلاصة ذلك أن مبدأ إنتروبيا أي نظام معزول لا يمكن أن تقل يعني ببساطة أن النظام لن يفصل بنفسه جزيئاته إلى مجاميع طاقة كلّ له متوسط مختلف (أو مكان أو كلاهما)، لأن مثل هذا الفصل سيعني امتلاك بعض درجات أعلى من الترتيب أو التنظيم — الأمر الذي هو إحصائيًّا غير محتمل وأبعد من ذلك، فميكروسكوبيًّا الإنتروبيا هي مقياس لعدم ترتيب أي نظام. وعندما تزداد إنتروبيا أي نظام فإن النظام يصبح غير مرتب.

وقد قُدِّم العديد من المخططات للتغلب على مبدأ عدم انخفاض الإنتروبيا للنظام المعزول، وأحد هذه المخططات المشهورة والخيالية تناولها عالم الفيزياء النظرية الاسكتلندي العظيم جيمس كلارك ماكسويل (١٨٣١–١٨٧٩). فقد تخيل صندوقًا يحتوي على جزيئات غاز في حالة اتزان حراري. وتم تثبيت جدار وسط الصندوق، مقسمًا الصندوق إلى نصفين. ويوجد في الجدار باب خفي كان مفتوحًا في البداية حتى مرت الجزيئات خلاله من كلا النصفين في الوعاء. ثم اقترح ماكسويل وجود جنِّي صغير بجانب الباب يمكن أن يفتح أو يقفل الباب بسرعة. وكان لدى هذا الجني الحس الشيطاني الذي يزعج القانون الثاني لديناميكا الحرارية؛ ولذلك سمي شيطان ماكسويل.

أراد الشيطان أن يعزل الجزيئات إلى مجموعتين: الجزيئات «الساخنة» أو السريعة إلى الجانب الأيمن من الوعاء، والجزيئات «الباردة» أو البطيئة إلى الجانب الأيسر من الوعاء. ويراقب الشيطان كل الجزيئات، بعناية شديدة مترقبًا تلك الجزيئات التي تقترب من الباب. فإذا اقترب جزيء سريع من الناحية اليمنى، يغلق الشيطان الباب بسرعة في وجهه فيرتطم الجزيء بالباب ويعود مرة ثانية إلى الجانب الأيمن من الصندوق. وعلى الجانب الآخر، إذا اقترب جزيء بطيء من الناحية اليمنى فسيفتح الشيطان الباب، ويترك الجزيء البطيء يمر إلى الناحية اليسرى من الصندوق. والجزيئات السريعة المقتربة من الجانب الأيسر للصندوق يسمح لها بالمرور، بينما الجزيئات البطيئة المقتربة من الباب من الجانب الأيسر ترتطم بالباب المغلق ويحتفظ بها في الجانب الأيسر. وهكذا وبعد فترة وبينما يحاول الشيطان أن يفصل الجزيئات إلى مجموعتين: واحدة لها متوسط طاقة حركة انتقالية أسرع وله درجة حرارة أعلى إلى اليمين، والمجموعة الأخرى لها درجة حرارة أقل إلى اليسار.

وينص القانون الثاني للديناميكا الحرارية على أن الجن أو الشياطين توجد فقط في القصص الخيالية، وأن شيطان ماكسويل هو من صنع خياله كما يعرف هو نفسه. والأكثر من ذلك أن القانون يقول إنه بدلًا من الشيطان، فأي اختراع آلي أو إلكتروني يمكن أن يحس بسرعات الجزيئات، ويتم تركيبه ليتحكم في العملية عند الباب، مثل هذا الاختراع لن يعمل إلا إذا اكتسب طاقة من مصدر خارج النظام، وعليه فلن يكون النظام في هذه الحالة معزولًا.

ويجب أن يعدل القانون الثاني كقانون إحصائي. ولأن الصورة الميكروسكوبية تتعامل مع احتمالات، فلا يمكن القول بالتأكيد المطلق أن أي مجموعة من الجزيئات لا يمكن تلقائيًّا أن تزيد من ترتيبها بقدر له معنى كما يقترح شيطان ماكسويل. لكن مثل هذا الحدث من الندرة بحيث يصعب أن نثق في إمكانية حدوثه، وفي أي حالة ثانية (أو ثالثة أو رابعة) لحدوث الأشياء التي هي مطلوبة للتحقق من أن هذا الترتيب يمكن فعلًا أن يحدث، سيكون مستبعدًا. فعلى المرء ألا «يكتم أنفاسه» منتظرًا وقوعه.

التضمينات الكونية والفلسفية: «الموت الحراري للكون»

وطبقًا لما نوقش في الفصل الرابع، اعتبر جوليوس روبرت ماير أن مصادر طاقة الأرض بدأت من الشمس، فمثلًا الطاقة المختزنة في الفحم كانت مشتقة من تحلل الخضار الذي نما لأنه اكتسب من قبل طاقة في صورة أشعة الشمس. وحتى الطاقة الحرارية في داخل الأرض، التي يظن أنها نتيجة إشعاع محجوز في باطن الأرض، جاءت بداية من المادة التي صنعت الأرض منها. وحتى هذه المادة، ووفقًا لفكرة سائدة اليوم، قد جاءت في الأصل من انفجار مستعر عظيم قديم، وتكونت كل المجموعة الشمسية من بقاياه، ويعتقد الآن أن مصادر الطاقة الكلية في الكون هي في الأساس النجوم، التي هي طبعًا ساخنة جدًّا. وبعض من الطاقة النووية للنجوم ينطلق على شكل حرارة معتمدة في ذلك على درجة حرارتها.

فإذا كان الكون كله نظامًا معزولًا ولا شيء خلاف ذلك، إذن يفترض أن هناك قيمة ثابتة من الطاقة في هذا النظام. وتتوزع هذه الطاقة في أنحاء الكون بطريقة ما. وتمثل النجوم المختلفة تركيزات عالية جدًّا من الطاقة، وعليه فهناك تنظيم في الكون. فمن المعقول أن نتوقع حتمية أن نجمًا معينًا سيبرد ويفقد حرارته. وربما يمر خلال حلقة معقدة في فعله ذلك. فالشمس مثلًا، قد تستهلك كل طاقتها المتاحة

الآن في عشرة بلايين سنة وفقًا لبعض التقديرات. وبينما تبرد، فإن ضغطها الذاتي سيقل (وفقًا لمعادلة حالتها)، ونتيجة لقوى تماسك الجاذبية فإن الشمس ستنهار، وعليه تشعل سلسلة جديدة من التفاعلات النووية، محولة بعضًا من طاقتها النووية إلى حرارة وعليه سترتفع درجة حرارتها مرة أخرى. إلا أنه بمرور الوقت ستشع الشمس كمية كبيرة من الطاقة بعيدًا بينما تبرد هي إلى حالة ثابتة من درجة حرارة منخفضة. ويفترض أن عمليات مشابهة لا بد أن تحدث في كل النجوم، وعليه ففي النهاية ستبرد كل النجوم في الكون وتعيد توزيع الطاقات التي كانت متاحة لها في السابق.

قد تستغرق هذه العملية وقتًا يتراوح بين ألف مليون سنة إلى مليون مليون سنة (١٠^٩ إلى ١٠^١٢)، لكن إذا ظل القانون الثاني للديناميكا الحرارية معترفًا به في النظام المغلق، فهذا ما سيحدث، وسيصل الكون إلى درجة حرارة متزنة يقدر أنها ستكون أقل كثيرًا من ١٥ كلفن. وستختفي كل الفروق في درجة الحرارة، وستصبح كل الآلات الحرارية غير قابلة للعمل، وحتى الحياة نفسها مستحيلة لأن الطاقة المطلوبة لاستدامة الحياة لن تكون متاحة. وسيصبح الكون كله غير منتظم أساسًا، لأن ظروف الاتزان هي واحدة: النهايات العظمى للإنتروبيا، وعليه النهاية العظمى للفوضى. وأكثر من ذلك أن أي شيء يزيد من الترتيب في أي جزء من الكون سيؤدي إلى اضطراب أكبر في باقي أنحاء الكون.

وتسمى النهاية الحتمية للكون «الموت الحراري للكون»، وسيكون الكون باردًا جدًّا بالفعل إذا حدث ذلك. وكان هذا المفهوم متضمنًا في كتابات كلاوزيوس وكتابات عالم الفيزياء النمساوي لودفيج بولتزمان، لكن أول من ناقشه باستفاضة كان لورد كلفن سنة ١٨٥٢.

وإذا كان الموت الحراري يمثل الحالة الحتمية للكون فإن مثل تلك الأفكار البشرية كحتمية التقدم وكمال الجنس البشري ما هي إلا أوهام. فإذا كانت النهاية الحتمية هي الفوضى، فما هي الفائدة من مسعى البحث العلمي الذي يبحث عن النظام؟ لقد تم التعامل مع فكرة الموت الحراري على أسس فلسفية وسياسية. إنها لعنة للمنظرين الماركسيين المتعصبين، لأن وجهة نظرهم المادية في الأساس، حساسة جدًّا لتضمينات العلوم للفلسفة. إلا أن هناك أسس أخرى للشك. وافتراض أن الكون هو نظام مغلق محل تساؤل بين حين وآخر. والأكثر من ذلك، افتراض أن قوانين الديناميكا الحرارية تنطبق على الكون كله بنفس الطريقة التي تنطبق فيها

تلك القوانين على جزئنا الصغير من الكون هو استيفاء من خبرة مبنية على نظم صغيرة نسبيًّا. وامتداد مبادئ معروفة في مناطق بعيدة عن تلك التي تم التحقق فيها من المبادئ كثيرًا ما يكون أمرًا فاشلًا. ونحن نعرف بالطبع، أن بعض الظواهر الفيزيائية في مناطق بعيدة جدًّا في الكون تبدو مشابهة لنفس الظواهر بالقرب من الأرض — تحليل الضوء من النجوم سواء أكانت قريبة أم بعيدة متناسق تمامًا. ولكن ليس هناك الكثير المعروف فعلًا عن الكون. إلا أنه ليس هناك دليل مباشر أن استنتاجات النظريات المعروفة ليست صالحة، وإذا وجد مثل هذا الدليل، فسنبذُل الجهود لتحوير النظريات بطريقة مناسبة. ولكن ببساطة لا يوجد الكثير من الأدلة: فالمشاهدات الفلكية الفيزيائية والكونية ما زالت علومًا في بدايتها إلى حد ما.

وحتى لو حاولنا بالمجادلات الإحصائية فإن استنتاج الافتراضات الاحتمالية المختلفة من أنظمة محدودة إلى أنظمة غير محدودة أساس لن يتم أبدًا تبريره بالفعل.

وبالرغم من ذلك فإن فكرة زيادة الإنتروبيا في نظم معزولة، من تحلل الطاقة والموت الحراري للكون كان لها تأثير ذو مغزى على الأفكار الثقافية والفلسفية منذ النصف الأخير للقرن التاسع عشر. فالتحليل المتزايد للشخصيات ولأفراد منعزلة أو مجاميع أو مجتمعات كلها مواضيع رئيسية كبيرة في الفكر والأدب الحديث. فكتابات لأناس من أمثال تشارلز بودلير وسيجموند فرويد وهنري أدمز وهيرمان ميلفيل وتوماس بيتكون وجون أبدايك وآخرين؛ برهان على ذلك. ولقد ضمن بعض الاقتصاديين أيضًا تشابهات ثرموديناميكية في دراساتهم، كما رأينا لأفراد مهتمين بالبيئة. (انظر مراجع الفصل الخامس.)

الفصل السادس

النسبية

الحقائق نسبية، لكن القانون مطلق



ألبرت أينشتاين
(يونيتد برس إنترناشونال).

النظرية النسبية ترتبط بشكل عام بألبرت أينشتاين وكذلك القنبلة الذرية والطاقة النووية، كما ترتبط بمفهوم أن كل شيء نسبي. لم تبدأ النسبية مع أينشتاين، علاوة على أن الطاقة النووية هي في الأساس ناتج ثانوي، وكانت أعمال أينشتاين مهتمة

بتحديد ما هو مطلق وما هو نسبي. ويأتي المغزى الحقيقي لنظرية أينشتاين من إعادة فحص افتراضات ميتافيزيقية معينة والإعلان مجددًا عن افتراضات أخرى، ومن إقرار هذه الافتراضات وكيفية تأكيدها للحقائق الفيزيائية والقوانين. وتوصف النظرية النسبية أحيانا بأنها نظرية حول النظريات، حيث إن النظريات الأخرى يجب أن تكون متسقة مع النظرية النسبية. وفي نفس الوقت هي تبين في استخداماتها كيف أن المفاهيم المجردة الموجزة والمقصورة على فئة معينة يمكن أن تكون لها تداعيات راسخة جدًّا في الحياة اليومية. من بين التداعيات المعنية، الإقرار بالتكافؤ بين الكتلة والطاقة والتحول المتبادل بينهما الذي قاد إلى فكرة الطاقة النووية. وتتضمن التداعيات الأخرى أفكارًا ثاقبة عن بنية المادة وحل كثير من المشكلات الفلكية ومراجعة المفاهيم الكونية. وتعود جذور هذه النظرية إلى الوراء إلى الثورة الكوبرنيكية والأسئلة المصاحبة لها حول الحركة المطلقة والهدوء المطلق والتسارع المطلق.

النسبية الجاليلية والنيوتونية

وضع نيوتن فروضًا معينة في كتابه برينكيبيا كما ناقشنا في الفصل الثالث دون ذكر برهان. وكان المتطلب الوحيد هو أن تكون الفروض متسقة فيما بينها. كانت هذه الفروض ضرورية لكي نحدد المصطلحات التي تصلح أساسًا لتطورات تأتي فيما بعد. وكانت طبيعة المكان والزمان من بين الأشياء المقترحة. ونظرًا لأن نيوتن يخطط ليشتق من حركة الأجسام القوى المؤثرة بينها، فكان لا بد أن يكون لديه أساس لشرح الحركة. ويفكر المرء غريزيًّا في الحركة من خلال المكان والزمان، وعليه فإنه يصبح ضروريًّا أن نكون دقيقين حول ما نعني بمفاهيم المكان والزمان.

وكان تعريف نيوتن للمكان «مكانًا مطلقًا، في طبيعته الخاصة به، دون أي علاقة بأي شيء خارجي، يبقى دائمًا متماثلًا ولا يتحرك ... بواسطة اسم آخر يمكن أن يطلق على الفراغ، المدى». وينص نيوتن أيضًا على أن أجزاء الفراغ لا يمكن رؤيتها أو لا يمكن تمييز بعضها عن بعض، لذا بدلًا من استخدام المكان المطلق والحركة المطلقة من الضروري أن يستخدم المكان النسبي والحركة النسبية (فيما يلي مناقشة أكثر).

لقد عرف نيوتن الزمن بهذه الطريقة: زمن مطلق وحقيقي ورياضي من نفسه، ومن طبيعته الخاصة به، ينساب باطراد دون أي علاقة بأي شيء خارجي، وبتسمية

أخرى يطلق عليه «الدوام». هناك فرق بين الزمن الموضوعي والزمن السيكولوجي. نحن كلنا نعرف أن الزمن سريع في بعض الأحيان وبطيء في ظروف أخرى، ويتوقف ذلك على الظروف. ولقد أقر نيوتن، كأمر عملي، أن الزمن الموضوعي يقاس بالحركة. فمثلًا، يمكن أن يقاس الزمن أثناء النهار بالحركة الظاهرية للشمس في السماء. وحتى بالرغم من أن نيوتن أقر بأن المكان النسبي والزمن هما اللذان يقاسان، أكد أن في نظامه توجد المفاهيم الأساسية المذكورة سابقًا، ويوجد غموض في تعريف نيوتن. فمثلًا أن نقول إن الزمن ينساب باطراد أو سلاسة فذلك يعني أنه يجب أن يكون هناك وسيلة مستقلة لإقرار ما هو الاطراد أو السلاسة. لكن هذه الكلمات نفسها تحتاج إلى معرفة الزمن.

وحيث إن نيوتن أقر بأن الموقع النسبي والحركة النسبية والزمن النسبي هي أمور تقاس عادة، يجب علينا أن نناقش ما نعني بالقياسات النسبية. فإذا قلنا إن حجرة دراسة معينة في كنت بولاية أوهايو تبعد أربعين ميلًا جنوب كليفلايد أوهايو، فهذا يعني موقعها بالنسبة لكليفلايد. وحجرة الدراسة نفسها يمكن وصفها بأنها تبعد عشرة أيام شرق مدينة أكرون بأوهايو. وبالمثل ربما يرجع إعلان رسمي إلى ٥٧٤٧ سنة منذ بدء الخليقة، أو ١٩٨٦ سنة منذ ميلاد المسيح، أو ٢١١ منذ استقلال الولايات المتحدة، يتوقف ذلك على التاريخ المرجعي الذي يقاس على أساسه الزمن.

موقع حجرة الدراسة كما هو موضح سابقًا لم يتحدد تمامًا، فمن الضروري أن نذكر الطابق المحدد من المبنى الذي توجد فيه حجرة الدراسة. في الواقع الموقع يحدد على الأرض بشكل أكثر شيوعًا بخطوط الطول والعرض والارتفاع عن مستوى البحر. هناك عدد كبير من الطرق المختلفة من خلالها يمكن تحديد موقع، ولكن في كل الأحول، هناك ثلاثة محاور ضرورية لتحديد نقطة معينة في الفراغ، لأن الفراغ له ثلاثة أحوال، أي: ثلاثة أبعاد. والنقطة في الفراغ هي موقع على خريطة بها ثلاثة أبعاد وتسمى Frame of Reference. وستعتمد القيم الفعلية للمحاور على اختيار بداية (النقطة النسبية التي عليها يقاس كل شيء) الإطار المرجعي، والتي يمكن أن تكون كليفلاند بأوهايو أو توبيكا بكنساس أو جرين ويش بإنجلترا أو موسكو بالاتحاد السوفيتي أو كيويتو بالإكوادور. وليس من الضروري أن يكون الأصل على الأرض، فيمكن أن يكون مركز الشمس أو حتى وسط مجرتنا. ويعتمد العدد الفعلي المستخدم للمحاور على أصل إطار المرجع، وأيضًا على ما إذا قيست المسافة بالأميال أو الكيلومترات أو الدرجات.

وعند الاستقرار على إطار مرجعي، يمكن قياس الحركة بالنسبة للإطار المرجعي، بتحديد كيفية تغير محاور جسم معين بمرور الزمن. وسرعة أي جسم تحدد نسبة إلى إطار مرجعي معين، وربما تعتمد القيم الفعلية على اختيار الإطار المرجعي، لأن الإطار نفسه ربما يكون متحركًا. فمثلًا أي تلميذ يجلس على كرسي في قاعة محاضرات تكون سرعته صفرًا بالنسبة لأي نقطة ثابتة على الأرض، لكن بالنسبة للشمس فإن هذا التلميذ يتحرك بسرعة ٦٧٠٠٠ ميل في الساعة لأن الأرض (التي يجلس عليها التلميذ) تتحرك بسرعة ٦٧٠٠٠ ميل في الساعة بالنسبة للشمس. وصاروخ يسافر بسرعة ١٠٠٠ ميل في الساعة بالنسبة لسطح الأرض قد يكون مسافرًا بسرعة ٦٨٠٠٠ ميل في الساعة بالنسبة للشمس، أو ٦٦٠٠٠ ميل في الساعة، أو سرعة وسط تعتمد على الاتجاه النسبي للحركة. لأن السرعة هي قيمة موجبة (راجع الفصل ٣)، واتجاه السرعة بالنسبة للشمس سيعتمد أيضًا على موقع الأرض في مدارها والدوران النسبي للأرض حول محورها، ولأن الشمس نفسها تكون في حركة بالنسبة لمركز المجرة، وسرعة الصاروخ بالنسبة للمجرة لها أيضًا قيمة أخرى، والمجرة نفسها في حركة بالنسبة للمجرات الأخرى.

وهكذا فكل من المحاور والسرعة له قيمة نسبية. وكل القيم المسبقة من محاور وسرعة لا بد أن تكون نسبية أيضًا (راجع فصل ٣): كمية الحركة، وطاقة الحركة، وطاقة الوضع على سبيل المثال.

من رؤية تعريف نيوتن للمكان والزمن المطلق، من المعقول أن نسأل ما السرعة الحقيقية للأرض عندما تتحرك خلال الفضاء — وليس سرعتها بالنسبة للشمس أو المجرة بل بالنسبة للفراغ المطلق. يتطلب قياس هذه السرعة نقطة مرجع ثابتة في الفراغ المطلق. وأحد الاقتراحات هو أخذ نقطة متوسطة للموقع المتوسط للنجوم الثابتة، ولكن ما الدليل على أن النجوم ثابتة في الفراغ؟ واضح أن هذه الأسئلة تتعلق بالمشكلة التي اهتم بها بطليموس وكوبرنيكوس وجاليليو وكبلر ومعاصريهم: هل هي الأرض التي تتحرك أم النجوم أم الشمس أم كلهم؟ وقد أكد جاليليو أنه من المستحيل أن نستنتج من تجربة أجريت على الأرض ما إذا كانت الأرض تتحرك بمفهوم مطلق حقيقي.

وقد أشار جاليليو إلى أنه إذا كانت سفينة تتحرك في ميناء، وسقط جسم من ساري السفينة فسيسقط مباشرة ويرتطم بسطح السفينة أسفل الساري، كما يرى من على السفينة. ولكن بالنسبة للمشاهد من على الشاطئ فالجسم لن يسقط في خط

مستقيم — بل سيسير في حركة صاروخية. والجسم يحافظ على حركته إلى الأمام لأن السفينة تحمله معها ويسقط اتجاه الأرض لحظيًّا. وينتج عن ذلك مسار قطع مكافئ عند الرؤية من الشاطئ. وبالرغم من ذلك ما زال الجسم يسقط على سطح السفينة مباشرة، لأن السفينة ما زالت تتحرك وتسير بنفس معدل حركة الجسم إلى الأمام. ولن يستطيع البحارة على السفينة أن يقولوا هل كانت السفينة تتحرك أم لا أثناء مراقبتهم للجسم أثناء سقوطه، لأنه يسقط في نفس المكان على السفينة بصرف النظر عن حركتها.

ويدرك البحارة أن هناك حركة نسبية بين السفينة والساحل فقط عندما ينظرون نحو الساحل. وطبعًا سيقولون إن السفينة تتحرك: وإنه من الصعوبة أن نعتقد أن السفينة قابعة في مكانها والشاطئ يتحرك. وبالمثل وجد جاليليو (ومن قبله كوبرنيكوس) أنه من الصعب أن تكون الأرض ثابتة وكل النجوم تتحرك. لكنه اعترف بأنه لم يبرهن على ما الذي يتحرك وبأي سرعة.

وفي الواقع ينص قانون القصور الذاتي — قانون نيوتن الأول للحركة — على أنه فيما يتعلق بالقوى، فكل الأشياء الأخرى مرجعية وتتحرك بسرعة ثابتة بعضها بالنسبة إلى بعض وتكون متكافئة. ومن المستحيل تحديد أي من الأطر المرجعية يكون فعلًا في حالة سكون في الفضاء المطلق وأي منها يكون أسرع من الآخرين. فالجسم المتحرك بسرعة ثابتة بالنسبة لأحد الأطر المرجعية يتحرك أيضًا بسرعة ثابتة مختلفة بالنسبة لإطار مرجعي آخر، يتحرك هو نفسه بسرعة ثابتة بالنسبة للإطار المرجعي الأصلي. إلا أن الجسم سيكون ساكنًا بالنسبة لإطار مرجعي آخر.

فمثلًا، إذا قذف رجل كرة بسرعة ٦٠ ميلًا في الساعة وهو في مؤخرة السفينة في اتجاه المقدمة التي تتحرك بسرعة ٣٠ ميلًا في الساعة تجاه الشرق، فبالنسبة للسفينة تتحرك الكرة بسرعة ٦٠ ميلًا/ساعة تجاه الشرق، وبالنسبة للمحيط فالكرة تتحرك بسرعة ٩٠ ميلًا/ساعة تجاه الشرق. وفي غياب قوى خارجية (الجاذبية أو مقاومة الريح) ستواصل الكرة تحركها بنفس السرعة. وأكثر من ذلك إذا كان هناك مروحية تطير شرقًا بسرعة ٩٠ ميلًا/ساعة بالنسبة للمحيط، فستكون سرعة الكرة بالنسبة للمروحية صفر؛ وتكون في حالة سكون. لا تستطيع القول إن الكرة تتحرك بسرعة ٩٠ ميلًا/ساعة لأن الأرض نفسها في حالة حركة.

كل الأطر المرجعية التي تنطبق فيها قوانين الحركة لنيوتن، وخاصة قانونه الأول، صحيحة، ويطلق عليها أطر القصور الذاتي المرجعية. ربما تكون هذه الأطر

المرجعية في حالة حركة بعضها بالنسبة إلى بعض لكن حركتها النسبية تكون عند سرعة ثابتة. وسيكون من المفيد أن نقارن بين إطار قصور ذاتي مرجعي وإطار مرجعي آخر بلا قصور ذاتي. فسيارة تتحرك بثبات بسرعة ٥٠ ميلًا/ساعة في نفس الاتجاه يمكن أن تستخدم كإطار قصور ذاتي مرجعي. فإذا استخدم سائق السيارة فجأة مكابح السيارة بينما تبطئ السيارة من سرعتها يصبح الإطار المرجعي بلا قصور ذاتي أو متسارع. وتبدأ الأشياء داخل السيارة تتسارع فجأة (بالنسبة للسيارة) حتى بدون استخدام أي قوة. والمسافر الذي يجلس في المقعد الأمامي ولا يربط حزام الأمان سيتسارع من حالة السكون ويصطدم بزجاج السيارة الأمامي. ولقد انتهك قانون القصور الذاتي (القانون الأول لنيوتن) في هذا الإطار المرجعي (لأن المسافر تسارع دون استخدام أي قوة عليه) ولذلك يسمى إطارًا مرجعيًّا دون قصور ذاتي. والإطار المرجعي الدوراني هو أيضًا إطار بلا قصور ذاتي. وعند إجراء الحسابات، غالبًا ما نهمل الإطارات المرجعية التي بلا قصور ذاتي، إذا كان ذلك ممكنًا على الإطلاق، لأن قوانين نيوتن للحركة لا تصلح مع هذه الأطر.*

حيث إن الكميات الديناميكية تقاس بمدلولات المكان والزمن، فكل القياسات التي تجري قد تعتمد على الإطار المرجعي المستخدم عند إجراء القياسات. فسرعة الكرة المذكورة سابقًا تعتمد على الإطار المرجعي. ومن الطبيعي يجب أن يكون من الممكن تحديد الخواص الطبيعية للكرة في أي إطار مرجعي. فإذا علمنا سرعة الكرة بالنسبة لإطار مرجعي معين (وليكن مثلًا بالنسبة للسفينة) فمن المحتمل أن نحسب سرعتها، أو أي كمية ديناميكية أخرى، بالنسبة للمروحية.

والمعادلات التي تجعل احتمال إجراء مثل هذه الحسابات ممكنة تسمى معادلات التحول. ومعادلات التحول هي في الواقع مثل القاموس الذي يسمح «لكلمات» تنطق في إطار مرجعي أن «تترجم» إلى إطار مرجعي آخر. وباستخدام معادلات التحول تستخدم المحاور والسرعة المقاسة في إطار مرجعي معين لحساب محاور وسرعات يمكن أن تقاس في إطار مرجعي آخر. (لأن الأطر المرجعية يمكن أن تكون في حركة

*والكلام بشكل قاطع، فالأرض إطار مرجعي بلا قصور ذاتي لأنها لا تتحرك في خط مستقيم، ولأنها تدور حول محورها. وتأثير التسارع الناتج ضعيف جدًّا إذا ما قورن بقوة الجاذبية على سطح الأرض، إلا أنه، ولأغراض عديدة، فالخطأ بأن نفرض أن الأرض إطار قصور ذاتي ليس بجسيم. إلا أن التأثيرات اللاقصورية فيها للدوران المغزلي للأرض هي التي تسبب الإعصار والزوابع.

نسبية فيما بينها، وتتضمن معادلات التحول أيضًا الزمن، كمعامل سيناقش فيما بعد.)

وكما ذكرنا من قبل، فكثير من القيم أو القياسات سيكون مختلفًا في أطر مرجعية مختلفة: الموقع والسرعة وكمية الحركة وطاقة الحركة وطاقة الوضع. وعلى الجانب الآخر، فبعض القيم لا تتغير بصرف النظر عن أي إطار قصور ذاتي مرجعي مستخدم: تسمى هذه القيم لامتغيرة invariant أو ثابتة Constant. ففي فيزياء نيوتن الأمثلة على مثل هذه القيم الثابتة هي: الكتلة والتسارع والقوة والشحنة الكهربية والزمن والمسافة بين نقطتين (الطول) ودرجة الحرارة والفرق في الطاقة والفرق في الجهد. وعند قياس تلك القيم بالنسبة لإطار مرجعي معين وحساب قيمها في إطار آخر، باستخدام معادلات التحول المناسبة فإن القيم الجديدة لا بد أن تتساوى تمامًا مع قيم الإطار المرجعي الأول. فإذا قيست القيم في الإطار المرجعي الثاني بدلًا من حسابها فستساوى تمامًا القيم المقاسة تبعًا للإطار المرجعي الأول.

لكن ليست الكميات وحدها المتغيرة القيم، قوانين نيوتن للحركة التي هي الأخرى لا تتغير من إطار قصور ذاتي مرجعي إلى آخر. وهذا يعني أن الصورة الرياضية لقوانين نيوتن للحركة هي نفسها لكل أطر القصور الذاتي المرجعي. فقانون بقاء الطاقة هو نفسه في كل أطر القصور الذاتي المرجعية، حتى بالرغم من أن كمية الطاقة الكلية ستختلف في أطر القصور المرجعية المختلفة. وبالمثل بالنسبة لقانون بقاء كمية الحركة نفسه في كل أطر القصور الذاتي المرجعية المختلفة، بالرغم حتى من أن كمية الحركة الكلية مختلفة في أطر القصور الذاتي المختلفة.

لقد منحت التسمية النسبية الجاليلية-النيوتونية لمواضيع النسبية والقيم الثابتة والعلاقات والتحولات من أطر القصور الذاتي المرجعية المختلفة كما نوقشت حتى الآن. تعتمد هذه العلاقات ومعدلات التحول بطريقة أساسية تمامًا على مفاهيم الزمان والمكان.

الكهرومغناطيسية والحركة النسبية

كان إنجازان من إنجازات الفيزياء في القرن التاسع عشر عظيمين، وهما تطور مفهوم الطاقة بكل تضميناتها، وتطور نظرية موحدة للكهربية والمغناطيسية. ولقد شكلت الثمار التكنولوجية لهاتين النظريتين ثقافتنا المادية وكان لتبعاتهما العملية نفس الانتشار.

وبعد أن تطورت النظرية الكهرومغناطيسية أثارت مرة ثانية احتمال تقدير سرعة الأرض في فضاء مطلق. وبينما كان الأمر وفقًا لميكانيكا نيوتن أنه ليس هناك طريقة تجريبية لتقدير ما إذا كانت الأرض تتحرك «واقعيًّا» بالحس المطلق على الأقل من تجربة ميكانيكية؛ اقترحت نظرية الكهرومغناطيسية عددًا من التجارب التي يمكن إجراؤها لتقدير حركة الأرض «الحقيقية».

والنظرية الكهرومغناطيسية هامة أيضًا لفهم بنية المادة، وذلك موضوع هام في الفصلين الآتيين، وعليه، من الجدير مناقشة مواضيع معينة من الكهربية والمغناطيسية هنا.

إنه أمر سهل بصفة خاصة أن تولد كهرباء استاتيكية عندما يكون الهواء جافًا، كما في الشتاء في أجواء باردة، عن طريق ظاهرة تعرف بالتأثير الاحتكاكي الكهربي Turboelectric effect. فإذا نزع المرء قطعة من الملابس مثل بلوفر أو عندما يمشط بالفرشة شعرًا طويلًا أو يلاطف قطة أو يسير على سجادة من الصوف، فإنه يشعر بوخز خفيف أو يسمع فرقعة أصوات أو يرى ومضات من الضوء أو يلاحظ تعلقًا استايتكيًّا لبعض الملابس. كل هذه التأثيرات والعديد الأكثر منها، نتيجة تولد كهرباء استاتيكية من احتكاك جسمين أو أكثر معًا. كان هذا التأثير معروفًا منذ أكثر من ألفين وستمائة سنة عن طريق طاليس الفيلسوف اليوناني، وهو أول من أقر بقيمة دراسة الرياضيات.

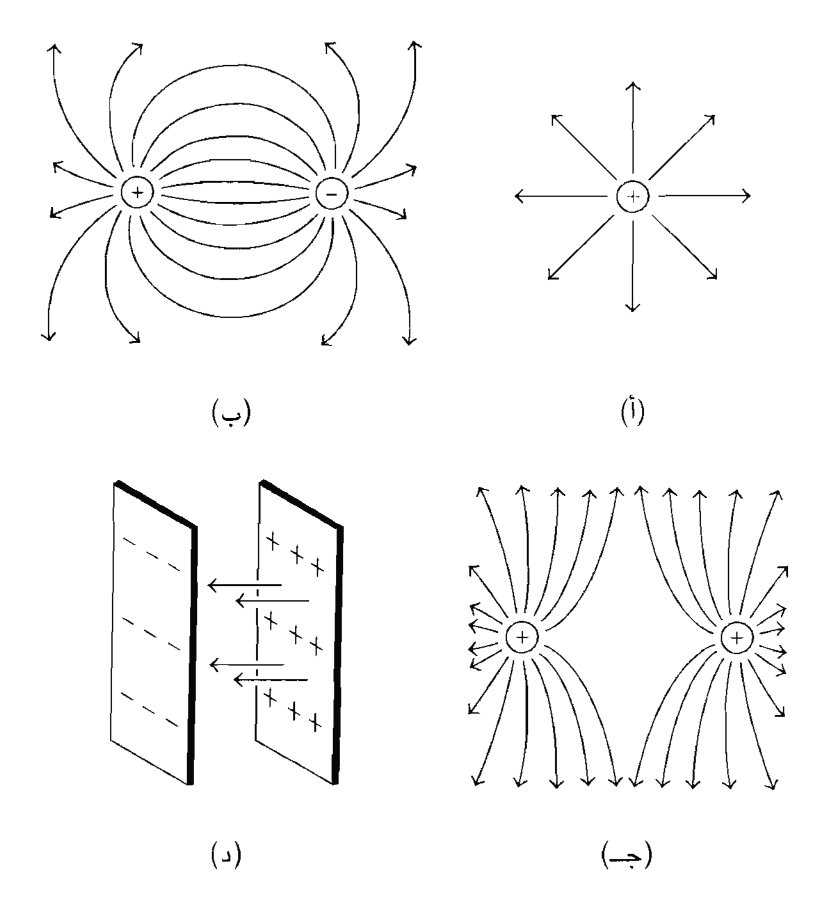
تتولد الكهرباء الاستاتيكية عن طريق انتقال الشحنة الكهربية من سطح جسم إلى جسم آخر. وبمرور الوقت تم التعرف على أن هناك نوعين من الشحنات الكهربية، إحداهما تسمى موجبة (+) والأخرى سالبة (−)، ومن الممكن فصل الشحنات الموجبة والسالبة بعضها عن بعض. تتنافر الشحنات الموجبة مع الشحنات الموجبة، وتتنافر الشحنات السالبة مع الشحنات السالبة، لكن الشحنات الموجبة والشحنات السالبة تجذب كل منهما الأخرى. وتسمى المعادلة الرياضية لحساب شدة القوى بين الشحنتين بقانون كولوم، وهذا القانون يشبه القانون العالمي للجاذبية: تتناسب القوة طرديًّا مع حاصل ضرب الشحنات وتتناسب عكسيًّا مع مربع المسافة بينهما. ومقدار أو كمية أي شحنة كهربية يشار إليها بالرمز q. والصيغة الجبرية للقوة بين الشحنتين Q,q هي $F = kQq/r^2$، حيث k هو ثابت التناسب وr المسافة بين الشحنتين. ولقد وجد تجريبيًّا أن كل الشحنات هي مضاعفات شحنة معينة واحدة، تسمى شحنة الإلكترون الذي يرمز له بالحرف e. (تقترح إحدى نظريات بنية الجسيمات تحت

النووية أن هناك شحنات مقدارها ثلثان وثلث e أيضًا، لكن مثل هذه الشحنات لم يتم التعرف عليها بعد في الحالة الحرة، راجع الفصل الثامن.)

وبالرغم من أن قانون كولوم يمكننا من حساب القوة بين شحنتين كهربيتين، فإنه لا يفسر كيف تنتقل القوة من شحنة إلى أخرى. ذلك هو نفس السؤال المشار إليه في الفصل الثالث فيما يتعلق بقانون نيوتن للجاذبية العالمية: كيف تتمكن الأجسام من أن تعبر الفضاء الخالي وتبذل قوى على بعضها البعض؟ (هذا السؤال نوقش فيما بعد في هذا الفصل، وبتفصيل أكثر إلى حد ما في الفصل الثامن.) وإحدى الطرق للتعامل مع سؤال بهذا الشكل، حول شيء نعرف عنه القليل جدًّا، هو أن تعطي الإجابة اسمًا. في هذه الحالة، فالوسائل التي بها تبذل شحنة كهربية قوة على شحنة كهربية أخرى تسمى المجال الكهربي.

يقال إن المجالات الكهربية كامنة في داخل طبيعة الشحنات الكهربية. ويقال إن الشحنة الكهربية q لها مجال كهربي مصاحب لها، يشار إليه بالرمز E. E هي كمية موجهة (راجع الفصل ٣) وتمتد على منطقة كبيرة من الفراغ، إلا أن مقدارها يصبح أقل كلما زاد بعد المسافة عن الشحنة الكهربية q. ويعطي شكل ٦-١(أ) تمثيلًا تخطيطيًّا للمجال الكهربي من شحنة كهربية مركزة (تسمى النقطة الشحنة). وتمثل الأسهم اتجاه المجال، ويعتمد مقدار المجال على مدى تقارب الأسهم. ولأن الأسهم موجهة بشكل نصف قطري، كما هو موضح بالشكل، فهي تقترب كثيرًا بالقرب من الشحنة وتبتعد عندما تكون بعيدة عن الشحنة، مبينة أن قيمة المجال تكون أكبر بالقرب من الشحنة وأقل بعيدًا عن الشحنة.

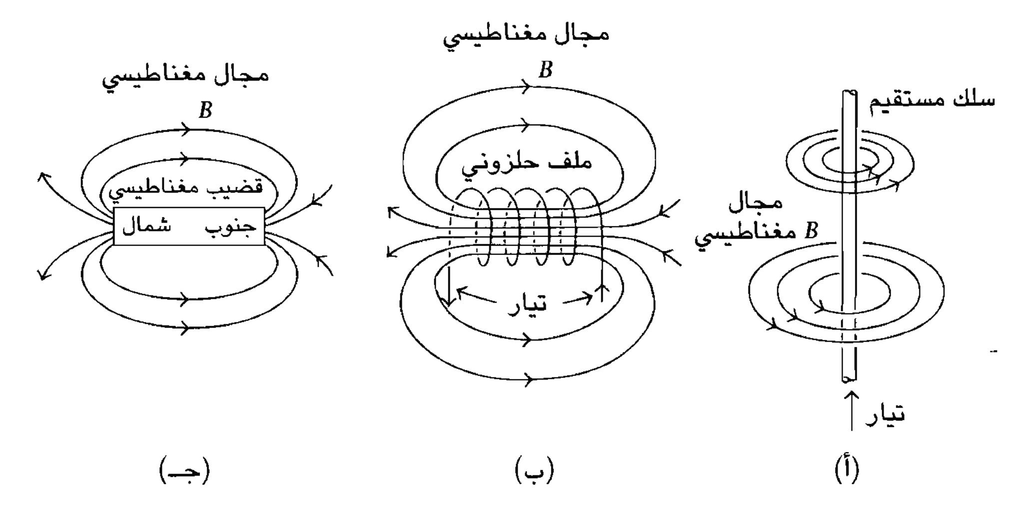
وإذا تواجدت عدة شحنات كهربية في منطقة معينة من الفراغ فإن التأثير الكلي للمجالات الكهربية يحسب بجمع المجالات الكهربية المفردة vectorially. ويبين شكل ٦-١(ب) المجال الكهربي الناتج لزوج من الشحنات الموجبة والسالبة المتساوي المقدار، وشكل ٦-١(جـ) يظهر المجال الكهربي الناتج من زوج من الشحنات الموجبة. ويظهر شكل ٦-١(د) المجال الكهربي الناتج عندما وضع ألواح من شحنات موجبة وسالبة متقابلة. إذا كان لا يزال هناك شحنة كهربية أخرى أحضرت إلى المنطقة من الفراغ الذي أُرسي فيه مجال كهربي، عندئذ ستتعرض هذه الشحنة الأخيرة لقوة تتناسب مع المجالات المجمعة للشحنات الموجودة، وفي اتجاه المجالات المجمعة (بالنسبة لشحنة موجبة، وفي الاتجاه المعاكس للشحنة السالبة). ويمكن اعتبار المجال الكهربي طريقة مفيدة لحساب القوى المبذولة بواسطة مجموعة الشحنات الكهربية



شكل ٦-١: تمثيل المجال الكهربي. تمثل علامات زائد وناقص الشحنات الموجبة والشحنات السالبة، والخطوط ذات الأسهم تمثل المجال الكهربي. (أ) شحنة موجبة معزولة (ب) شحنات +، − متساوية. (جـ) شحنات + متساوية. (د) ألواح من شحنات + و−.

على شحنة أخرى. إلا أنه وكما يشار لاحقًا فإن مفهوم المجال الكهربي له استخدامات أكثر عمقًا.

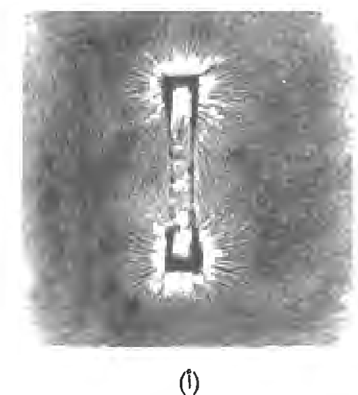
وقد عرفت التأثيرات المغناطيسية منذ الأزمنة القديمة. والتأثيرات المغناطيسية تشبه التأثيرات الكهربية في عدة طرق. وقد أعطيت الشحنات المغناطيسية أسماء مختلفة عن الشحنات الكهربية، وتسمى أقطاب مغناطيسية. هناك أقطاب شمالية (في بعض الأحيان تسمى أقطاب ناحية الشمال) وأقطاب جنوبية (أقطاب ناحية الجنوب). وهناك أيضًا مجالات مغناطيسية. إلا أنه من المستحيل (على الأقل حتى اليوم) فصل الأقطاب الشمالية عن الأقطاب الجنوبية ككينونات متميزة بنفس الطريقة الممكنة لفصل الشحنات الموجبة والسالبة كل منهما عن الأخرى. والأكثر



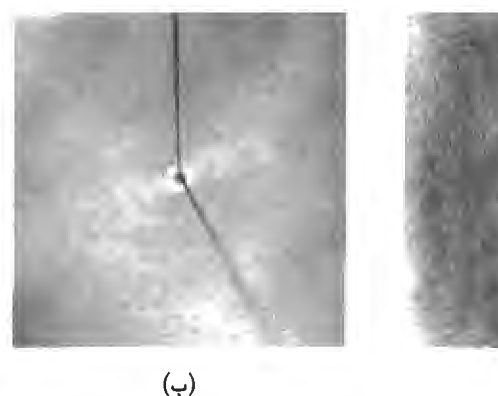
شكل ٦-٢: مجالات مغناطيسية. (أ) من تيار صاعد في سلك طويل مستقيم. (ب) من تيار في ملف حلزوني من السلك. (جـ) من قضيب مغناطيسي.

من ذلك أن كل التأثيرات المغناطيسية المعروفة في الحاضر يمكن أن تعزى إلى حركة الشحنة الكهربية.

عندما تكون شحنة كهربية واحدة أو أكثر في حركة، تكون هذه الحركة تيارًا كهربيًّا. (يقاس التيار الكهربي بوحدات تسمى الأمبير.) ويرتبط مع التيار الكهربي مجال مغناطيسي يشار إليه بالرمز B. والعلاقة بين B والتيار الكهربي المرافق تختلف تمامًا عن العلاقة بين E وq، كما هو موضح من الشكل ٦-٢. إذا كان التيار الكهربي ممثلًا خلال سلك (لأن المجال الكهربي يسير خلال سلك) فالمجال المغناطيسي المصاحب سيتوجه في نسق على شكل دائري حول السلك (شكل ٦-٢(أ)). يتناقص مقدار المجال المغناطيسي بزيادة البعد عن السلك. فإذا كان للسلك شكل حلزوني محكم (شكل ٦-٢(ب)) فالمجال المغناطيسي داخل الحلزون يتخذ اتجاهًا بمحاذاة محور الحلزون. ويكون نسق المجال المغناطيسي خارج الحلزون مطابقًا لقضيب مغناطيسي (شكل ٦-٢(جـ)) يتضمن القطب الشمالي والقطب الجنوبي. على العموم، فالتأثيرات المغناطيسية تنتج من وجود تيارات كهربية مصحوبة بالبنية الديناميكية الذرية والجزئية. وبمعنى آخر، التأثيرات المغناطيسية تعود إلى حركة الشحنات الكهربية ومن ثم فإن وجود التأثيرات المغناطيسية نفسها هو موضوع نسبي. وتتطلب التأثيرات المغناطيسية فقط حركة نسبية للشحنات الكهربية.



(أ)

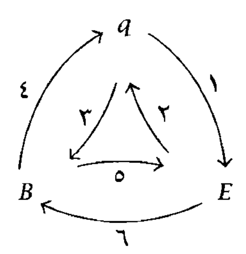


(ب)

شكل ٦-٣: صور لانتظام برادة الحديد في وجود مجالات مغناطيسية. (أ) في مجال قضيب مغناطيسي. (كاتي بيندو). (ب) في مجال سلك يحمل تيارًا. (شركة خدمات تعليمية).

وتشبه المجالات المغناطيسية المجالات الكهربية في عدة أوجه: لقد جمعت المجالات المغناطيسية نتيجة التيارات المختلفة أو تحرك الشحنات التأثيرات التي حسبت عن طريق حاصل الجمع vectorially للمجالات المغناطيسية للتيارات المفردة أو الشحنات المتحركة. وسيبذل المجال المغناطيسي قوة على أي تيار وشحنة متحركة آخرين قد يكونان متواجدين.

وتثير المجالات المغناطيسية نفس المشكلات التي أثارتها المجالات الكهربية. فالمجال الكهربي هو الميكانيكا التي بها تبذل الشحنة الكهربية (أو التيار الكهربي) قوة على شحنة كهربية أخرى متحركة. ولقد تم التوصل إلى صيغ لحساب القوة، إلا أنه لا يوجد تفسير واضح لكيفية «وصول» شحنة واحدة عبر فضاء خال ليبذل قوة على شحنة متحركة أخرى. (وسيناقش هذا السؤال أيضًا في الفصل الثامن) إلا أنه كما في حالة المجال الكهربي فإن المجال المغناطيسي أكثر من مجرد طريقة مفيدة لحساب القوى. وفي الواقع فإن المجالات المغناطيسية، مثل المجالات الكهربية، يمكن جعلها مرئية، كما هو مبين في الشكل ٦-٣، الذي يبين استخدام برادة الحديد للكشف عن المجالات المغناطيسية للأسلاك والقضبان المغناطيسية. وحساب القوة هو أمر أكثر صعوبة من حساب القوة المرتبطة بالمجال الكهربي. ولا تعتمد القوة في هذه الحالة على مقدار المجال المغناطيسي والشحنة المتحركة فقط بل أيضًا على سرعة الحركة، متضمنة السرعة والاتجاه. والقوة عمودية على كل من المجال المغناطيسي الأصلي واتجاه الشحنة الأصلي.



شكل ٦-٤: شكل على هيئة مثلث يبين العلاقة بين q, E, B. والأسهم في الشكل ليست متجهات vectors لكنها تمثل العلاقات الموضحة في المتن. بتصريح من Kenneth W. Fordd, Basic Physics, N. Y. John Wiley & Sons 1968.

ولأن القوة المبذولة بالمجال المغناطيسي تعتمد على السرعة، فإن التأثيرات النسبية موجودة أيضًا. ويسمح ذلك بإمكانية معرفة الحركة المطلقة ويؤدي أيضًا بالفيزياء إلى التناقض التالي: إذا كانت السرعة تعتمد على الإطار المرجعي، والقوة تعتمد على السرعة، إذن السرعة يجب أن تعتمد على الإطار المرجعي. ولكن وفقًا لنسبية جاليليو-نيوتن فإن القوة يجب أن تكون ثابتة ولا يجب أن تعتمد على الإطار المرجعي!

يمثل الشكل ٦-٤ مخططًا رمزيًا لإظهار العلاقة بين الشحنات الكهربية والمجالات الكهربية، وبين الشحنات المغناطيسية والمجالات المغناطيسية. عند قمة المثلث عند مجموعة الرموز يوجد q وفي الركن الأيمن الأدنى يوجد E. ويشير السهم ١ إلى أن مجالًا كهربيًا يصاحب الشحنة الكهربية (أو يتكون بواسطتها). ويشير السهم ٢ إلى أن المجال الكهربي سيبذل قوة على أي شحنة كهربية أخرى موجودة. وفي الواقع إذا بذلت أي قوة على أي شحنة كهربية فسيكون هناك مجال كهربي بالفعل. يشير السهم ٣ إلى أنه يرتبط بالشحنة الكهربية المتحركة (التيار الكهربي) مجال مغناطيسي B. أما السهم ٤ فيشير إلى أن المجال المغناطيسي يبذل قوة على أي شحنة كهربية متحركة قد تكون موجودة. وحيث إن الحركة نسبية، فسيبذل المجال المغناطيسي قوة على الشحنة الثابتة.

حتى المجال المغناطيسي المتغير يبذل قوة على الشحنة الثابتة. وعلى كل، وكما ذكرنا فيما يتعلق بالسهم ٢ ففي أي وقت تشعر الشحنة الكهربية بوجود قوة فلا بد أنه يوجد مجال كهربي. وهكذا في الواقع فالمجال المغناطيسي المتغير يُحدث (أو يكافئ) مجالًا كهربيًا. وهذا موضح في الشكل ٦-٤ بواسطة السهم ٥ ما بين B, E. والعلاقة التبادلية هي أيضًا صحيحة: المجال الكهربي المتغير سوف يحدث مجالات مغناطيسية.

تتضمن الاستخدامات التكنولوجية الكهرومغناطيسية العلاقات الستة الممثلة في الشكل ٦-٤ بواسطة الأسهم. فمثلًا، من المعتاد استخدام المجالات الكهربية لاستحداث أشعة من الإلكترونات لكي تعطي صورة على جهاز استقبال التليفزيون. كما تستخدم المجالات المغناطيسية الناتجة عن التيار الكهربي في تكوين مرحِّلات ومغناطيسيات مكهربة. والقوة المغناطيسية هي الآلية الأساسية التي تعمل في الموتورات والمولدات الكهربية، وتستخدم القوى المغناطيسية على الشحنات الكهربية المتحركة لتُحيد مسار شعاع الإلكترون ليكون الصورة على شاشات التليفزيون. ويمثل خلق مجالات كهربية عن طريق تغيير المجالات المغناطيسية العمل الأساسي للمحولات الكهربية.

لقد تجسدت كل تلك الإمكانيات من الإنجازات في تطور العلوم والتكنولوجيا في القرن التاسع عشر، لكن كان أعظم الإنجازات (على الأقل من وجهة النظر العلمية البحتة) هو تحقق جيمس كلارك ماكسويل، مبدع شيطان ماكسويل، أن الظواهر الممثلة بالأسهم ٥، ٦ في شكل ٦-٤ هامة لفهم طبيعة الضوء. ويشير السهم ٥ إلى أن المجال المغناطيسي يُحدث المجال الكهربي. ويعتمد مقدار المجال الكهربي الناتج على المجال المغناطيسي الذي يغير منه. فإذا كان ذلك المعدل يتغير بثبات، فإن المجال الكهربي الناتج يكون ثابتًا. وعلى الجانب الآخر إذا كان المجال المغناطيسي غير مستقر فإن المجال الكهربي الناتج لن يكون مستقرًّا — سيكون متغيرًا. لكن السهم ٦ يمثل حقيقة أن المجال الكهربي المتغير سيكون مجالًا مغناطيسيًّا. وفوق ذلك فالمجال الكهربي المتغير الذي يتغير بمعدل غير ثابت سينتج مجالات مغناطيسية غير ثابتة (متغيرة). ومن المحتمل تكون سلسلة مستمرة: مجال مغناطيسي غير ثابت يولد مجالًا كهربيًّا متغيرًا غير ثابت، الذي بدوره يكون مجالًا مغناطيسيًّا متغيرًا غير ثابت، الذي يكون مجالًا كهربيًّا غير ثابت، وهكذا.

كان ماكسويل قادرًا على أن يظهر أن تلك المجالات الكهربية والمغناطيسية تكون كل منها الآخر باستمرار، وتتكاثر (تنتشر) أيضًا خلال الفضاء بسرعة معينة، استطاع هو حسابها = ٨٦٠٠٠ ميل (أي ٢٩٧٦٠٠ كيلومتر) في ثانية — سرعة الضوء! وهكذا انتهى ماكسويل سنة ١٨٦٤ إلى أن الضوء يمكن تفسيره على أنه ناتج من مجالات كهربية ومغناطيسية تتغير وتنتشر بسرعة ويصاحب بعضها بعضًا عن قرب. وتسمى بالمجالات الكهرومغناطيسية. وفي الواقع فإن الضوء يمثل جزءًا ضئيل جدًّا من الظاهرة العامة لتوليد المجالات الكهرومغناطيسية، كما سنقوم بمناقشته بالتفصيل فيما يلي.

كان ماكسويل أثناء دراسته للقوى الكهربية والمغناطيسية، مثل الكثير من معاصريه. مهتمًّا بالسؤال الأساسي التالي (الذي ينطبق أيضًا على قوى الجاذبية): *ما الضوابط الآلية التي تتحرك بها شحنة كهربية واحدة (أو كتلة واحدة) عبر الفضاء الخالي وتبذل قوة على شحنة كهربية أخرى (أو كتلة)؟* قال نيوتن — كما ذكر في الفصل الثالث: «إني لا أقدم فرضيات.» إحدى الإجابات هي «من خلال مجالهما الكهربي (أو الجاذبية).» لم تكن هذه الإجابة مقنعة بما فيه الكفاية لعلماء القرن التاسع عشر؛ حيث إنها لم تكشف (توضح) ما هو المجال الكهربي.

اقترح ميخائيل فاراداي تشابهًا بين الأسهم المستخدمة لتوضيح المجالات الكهربية (راجع الشكل ٦-١) والحلقات المطاطية: يبدأ السهم عند شحنة موجبة وينتهي عند شحنة سالبة. وتقع الشحنة تحت شد مثل شريط مطاطي مشدود، ومن ثم يبذل قوة جذب على طوله ما بين الشحنات الموجبة والسالبة (شكل ٦-١(ب)). بالإضافة إلى أنه عند الانكماش تميل الشرائط المطاطية إلى أن تدفع ليبتعد بعضها عن بعض، وبهذا نفسر لماذا تتنافر شحنات من نفس النوع بعضها مع بعض (٦-١(جـ))، ولماذا يظهر نسق انتشار الشرائط كما هو في الأجزاء المختلفة في الشكل ٦-١. تسمى هذه الشرائط خطوط مجالات، أو بعبارة أكثر تحليلًا: خطوط قوى. وبالمثل يمكن وصف المجال المغناطيسي بمدلول خطوط مجال مغناطيسي يربط الأقطاب المغناطيسية، ومجال الجاذبية بمدلول خطوط الجاذبية التي تربط الكتلة.

ومن الممكن فعليًّا أن نستخدم فكرة خطوط المجال للتوصل إلى معادلات رياضية للقوى بين الشحنات الكهربية، لكن من الصعوبة بمكان أن تعتقد أنها تحمل واقعية هادفة. وبالرغم من روح قصة أفلاطون «الكهف» الرمزية، فقد يحاول المرء أن يبررها على أنها تمثيل «للواقعية الحقيقية» خلف المشاهد، بنفس الطريقة التي اقتنع بها أتباع نظرية بطليموس بالكرات السماوية كما نوقشت في الفصل ٢. وهو أمر صعب أن تستطيع الأجسام التحرك دون أن تتداخل وتتشابك كل مجالاتها الكهربية والمغناطيسية والجاذبية.

ولقد اقترحت طريقة أخرى أكثر تقدمًا وأناقة للتعامل مع مشكلة «الفعل عن بعد». ربما قد ركز على أنه ليس هناك شيء اسمه فضاء خال (كما فعل أرسطو)، لكن قد تقول إن كل الفضاء مملوء بمادة يطلق عليها الأثير، وهي نوع من مادة ليس لها كتلة على كل حال. (كان أثير أرسطو يوجد فقط في المناطق التي تعلو المنطقة القمرية. وبحلول القرن التاسع عشر اعتبر أن الأثير موجود في كل مكان.)

عند إخال جسم مادي أو شحنة كهربية أو قضيب مغناطيسي في الأثير، يتشوه الأثير أو ينضغط بطريقة ما ليفسح مكانًا لما تم إدخاله. وتمثل خطوط المجال الكهربي تشوه الأثير الناتج من إدخال الشحنة الكهربية — فالمجال الكهرومغناطيسي المتوالد الذي هو الضوء يمثل اهتزاز التشوه الموجود في الأثير.

وبحلول الجزء الأول من القرن التاسع عشر أصبحت النظرية الرياضية للكهربية معروفة بشكل كامل ومحققة. واستطاع ماكسويل أن يُعدِّل من نظرية الجوامد المرنة إلى فرضية الأثير الكهربي تلك، وأن يمثل كلًّا من مجالي الكهربية والمغناطيسية على أنهما تشوهات للأثير. ووصف ماكسويل الضوء على أنه موجة من التشوهات تتكاثر خلال الأثير. من هذا المنطلق فالموجات الكهرومغناطيسية هي مثل موجات الصوت في الهواء، أو في الماء، أو في أي وسط آخر. ولقد تم التوصل إلى النظرية الرياضية لمثل هذه الموجات بمدلول خواص المادة. وموجات الكهرومغناطيسية لها خواص معينة لأن الوسط لهذه الموجات، أيْ الأثير، يختلف عن الهواء أو الماء. (أحد الاختلافات أن الموجات في الهواء أو الماء أو أي مانع آخر هي موجات طويلة، بينما الموجات في جامد يمكن أن تكون عرضية وأيضًا طويلة.) وأحد النتائج الهامة لأعمال ماكسويل أنه كان قادرًا على أن يبين أنه ليس من الضروري أن يكون هناك أثير لكل تأثيرات كهربية وأثير آخر للتأثيرات المغناطيسية وأيضًا ثالث للضوء. أثير واحد كاف — الأثير الكهرومغناطيسي، وأنواع التأثيرات المختلفة من كهربية ومغناطيسية وكهرومغناطيسية (ضوء) هي ببساطة أنواع مختلفة من التشوهات وتوافقات من التشوهات في نفس الأثير، (وطبيعي أنه لم يضمن تأثيرات الجاذبية في هذا الأثير، وهكذا يمكن تصور أنه ربما يوجد أثير مفضل للجاذبية).

وكما أشرنا من قبل، لقد بين ماكسويل سنة ١٨٦٤ أنه من المحتمل تطور موجات في المجال الكهرومغناطيسي وأن هذه الموجات يجب أن تنتقل بسرعة الضوء. وفي الحقيقة لقد دارت مجادلة مثيرة قبل ذلك بحوالي خمسين سنة حول طبيعة الضوء، وقد كان هناك بعض الأفكار في العصور القديمة مفادها أن الضوء ينشأ في عيون شخص ينظر إلى شيء ما. وبالفعل، فعبارة «ألقى نظرة على هذا» تحمل في طياتها أن العيون ترسل شعاعًا لبحث الجسم الذي سيراه. وحتى سوبرمان الشخصية السينمائية ترى بتلك الطريقة، إلا أنها رؤية تحدث بطريقة خاصة؛ لأنه يرسل أشعة X حتى إنه يستطيع أن يرى ما وراء الحوائط.

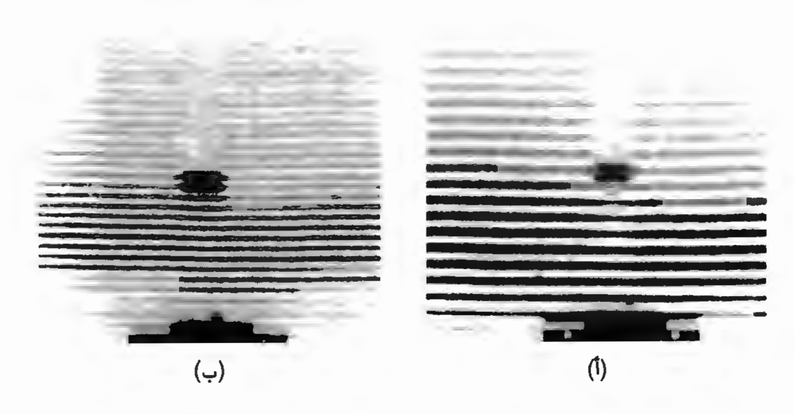
ولم يقتنع نيوتن بأن العين ترسل شعاعًا من الضوء، لكنه اعتقد أن الضوء يتكون من تيار من الجسيمات (قذائف صغيرة) تجعل الأجسام مرئية بأن تجعل الأجسام تتواثب في أعين المشاهد. أحد أسباب هذا الاعتقاد كان حقيقة أن الضوء يبدو أنه يتحرك في خطوط مستقيمة كما تم البرهنة على ذلك بحدة الظل.

إلا أن، بعض معاصري نيوتن أشاروا إلى الدليل على أن الضوء هو نوع من الاضطراب ينتقل بواسطة موجة حركة، تمامًا مثل الصوت؛ هو اضطراب هواء ينتقل بموجة حركة، أو كاضطراب أو تشوه لسطح جسم في الماء ينتقل بحركة موجة. وبمرور الزمن أصبحت البراهين التجريبية في صالح نظرية الموجة طاغية إلى أن صارت مقبولة عالميًّا.

إحدى المميزات التي يمكن وصف الموجة بها هي المسافة بين القمم المتتالية للموجة، طول الموجة. فطول موجات الماء المرئية يمكن أن يتراوح بين بضع بوصات (سنتيمترات) إلى عشرات أو مئات الأقدام (أمتار). وتتراوح أطوال الموجات الصوتية المسموعة في الهواء من بوصات قليلة إلى عدد من الأقدام القليلة. وعلى الجانب الآخر، فطول موجة الضوء التي تشعر بها أعيننا، هو قصير جدًّا حوالي ١/٢٠٠٠٠ من البوصة — وهي حقيقة معروفة منذ بداية القرن التاسع عشر. وإنه بسبب هذه الموجات الشديدة القصر يمكن للضوء أن يتشكل على هيئة «أشعة» يبدو أنها تتحرك في خطوط مستقيمة وتعطي ظلالًا محددة واضحة. ويعرض شكل ٦-٥ تأثير طول الموجة على «الظل» المتكون بموجات الماء. وفي شكل ٦-٥ متى كان طول الموجة أقصر يصبح «الظل» أكثر تحديدًا!

وطبيعة موجة الضوء مسئولة أيضًا عن ظهور ألوان في الضوء المنعكس من فقاعات الصابون أو من طبقة الزيت في الشوارع بعد سقوط المطر مباشرة. وينتج اللون من ظاهرة تسمى التداخل، وستناقش بصورة أكثر في الفصل السابع. وتظهر أيضًا طبيعة موجة الضوء في تأثير يطلق عليه الحيود، وهو المسئول عن الألوان التي تُرى من «الحيود في المجوهرات» أو عندما ينعكس الضوء بزاوية مباشرة من أسطوانات الفيديو، أو مثلًا من أسطوانات الموسيقى تلك ذات الـ ٣٣,٥ أو ١٦,٥ لفة/دقيقة.

هناك خاصية أخرى للموجات وهي ترددها، وهو عدد قمم الموجات التي تعبر في الثانية نقطة معينة أثناء انتشار الموجات. والضوء الذي نراه له تردد حوالي ٥٠٠ مليون قمة موجة في الثانية. وحاصل ضرب تردد الموجة في طول الموجة يعطي سرعتها = ١٨٦٠٠٠ ميل في الثانية للضوء.



شكل ٦-٥: صورة موجات الماء في مستودع متموج (تم نسخها بإذن من مركز تنمية التعليم، نيوتن. ماساتشوسيتس).

وإلى أن قام ماكسويل بأبحاثه كان يعتقد أن موجات الضوء تنتقل من خلال أثير خاص، فالموجات يجب أن تسير في وسط ما؛ فبدون أي ماء لن يكون هناك موجة ماء، وبدون الهواء لن يكون هناك موجة صوت، كما تم إثبات ذلك في الحقيقة، وأن موجات الصوت غير موجودة في الفراغ. وأصبح من المفروض إذن أنه لا بد لموجات الضوء من أثير خاص يطلق عليه الأثير الوضاء، الذي يملأ كل الفضاء. وكما أشرنا من قبل فقد استطاع ماكسويل أن يبين أن الأثير الوضاء والأثير الكهربي والأثير المغناطيسي لا بد أنها كلها أثير واحد وأن موجات الضوء تمثل اضطرابًا لهذا الأثير.

وإحدى النتائج الهامة للنظرية الكهرومغناطيسية لماكسويل هي التحقق من أن موجات الضوء تمثل جزءًا صغيرًا فقط من الموجات الكهرومغناطيسية التي يمكن توليدها، فمثلًا يمكن توليد موجات الراديو كما بين ذلك هنريتش هيرتز العالم الألماني سنة ١٨٨٦. تتولد الموجات الكهرومغناطيسية عندما تضطر الشحنة الكهربية أن تتأرجح (تهتز). في الواقع إن الشحنة الكهربية «تموج» مجالها الكهربي تقريبًا كالتلويح بسوط طويل. ومن الطبيعي أن نموذج المجال الكهربي يشبه حزمة من الشرائط المطاطية، استخدامًا لتشبيه فاراداي، لكن هذا يجلب المجال الكهربي المتغير غير الثابت المطلوب لتكوين الموجة الكهرومغناطيسية كما تم وصفه سابقًا. واستطاع هرتز أن يولد تيارًا كهربيًّا متذبذبًا بتردد اهتزازات لها ترددات من بضع مئات الملايين في الثانية. ويتراوح طول هذه الموجات ما بين اثنين وثلاثة أقدام، بناء على التردد. وتبعا لذلك، اخترع المهندس الإيطالي جوجليلمو ماركوني Guglielmo Marconi التلغراف اللاسلكي لإرسال البرقيات بواسطة موجات الراديو. وأرسلت

جدول ٦-١: الطيف الكهرومغناطيسي.

نوع الموجة	التردد (هيرتز)*	طول الموجة (متر)*
التيار المنزلي المتردد العادي	٦٠**	٥ × ١٠^٦ (٣١٠٠ ميل)
موجات الراديو .A.M	١٠^٦	٣٠٠
التلفزيون	١٠^٩	٠,٣
الموجات الميكروويةٍ/رادار	١٠^١١	٠,٠٠٣
تحت الحمراء	١٠^١٣	٠,٠٠٠٠٣
الضوء المرئي	٥ × ١٠^١٤	٦ × ١٠^-٧
أشعة X	٣ × ١٠^١٨	١٠^-١٠

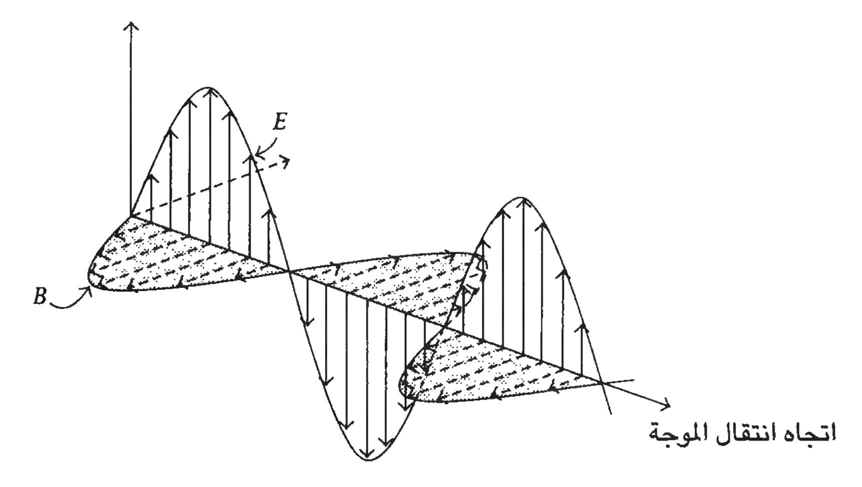
*هيرتز تعني دورات أو موجات/ثانية، والمتر = ٣٩,٣٧ بوصة، ١٠^٦ يعني ١ متبوعًا بـ ٦ أصفار أي مليون، و١٠^١١ تعني ١ متبوعًا بـ ١١ صفرًا، و١٠^-٧ تعني ١ مقسومًا على ١٠^٧. وحاصل ضرب التردد في طول الموجة هو ٣ × ١٠^٨ وهي سرعة الموجات الكهرومغناطيسية في الفضاء الخالي بالمتر/ثانية.
**التردد العادي في مصر ٥٠ وفي أمريكا ٦٠.

أول رسائل بالراديو عبر الأطلنطي بواسطة موجات ذات تردد ٢٠٠٠٠٠ ذبذبة في الثانية بطول موجة طوله ميل تقريبًا!

ويطلق على كل مدى الموجات الكهرومغناطيسية الطيف الكهرومغناطيسي، الذي يبين الشكل ٦-١ مداه. وكل الموجات الكهرومغناطيسية المدونة بالجدول تنتقل في فضاء خال بسرعة الضوء ١٨٦٠٠٠ ميل لكل ثانية.* وتتوقف الاختلافات بينها كلية على طول موجاتها أو تردداتها. فالموجات ذات الطول القصير لها تردد عال والعكس صحيح. ويكون حاصل ضرب طول الموجة في التردد ثابتًا ويساوي سرعة الموجة. لاحظ أن أطوال الموجات بالجدول معطاة بالأمتار، وهذا عادي بالنسبة لموجات الراديو.

ويمكن وصف الموجة الكهرومغناطيسية على أنها اتحاد نبضات المجالين الكهربي والمغناطيسي ممتزجين معًا. ويبين شكل ٦-٦ كيف تختلف المجالات الكهربية والمغناطيسية في موجة كهرومغناطيسية تتحرك في اتجاه السهم المظلل ثقيلًا. وتظهر في الشكل، متجهات المجال الكهربي E على أنها متغيرة في القيمة على طول

*سرعة الضوء في وسط مادي مثل الزجاج أو الماء أقل منها في الفضاء الخالي. والنسبة بين سرعة الضوء في الفضاء الخالي إلى سرعته في الوسط المادي يطلق عليها معامل انعكاس الوسط. وتكون سرعة الموجات الكهرومغناطيسية في أغلب الأحيان في الوسط المادي غير ثابتة، لكنها تختلف مع أطوال الموجات المختلفة، ويطلق على هذه الظاهرة التشتت.



شكل ٦-٦: موجة كهرومغناطيسية. تغير المجال الكهربي E والمجال المغناطيسي B على اتجاه مسار مستوى موجة كهرومغناطيسية.

مسار الاتجاه، لكنها مقيدة فقط بالمستوى الرأسي. وعندما تتغير متجهات المجال المغناطيسي B أيضًا في اتجاه السير مقيدة بالمستوى الأفقي، وعندما تلتزم E, B كما في الشكل؛ يقال إن الموجة الكهرومغناطيسية مستقطبة المستوى. ويجب الإشارة إلى أن المتجهين النابضين E, B يكونان دائمًا متعامدين أحدهما على الآخر وعلى مسار الاتجاه، وهذا التعامد صحيح لكل الموجات الكهرومغناطيسية. وتسمى الموجات العمودية على مسار الاتجاه بالموجات العرضية.

وعلى النقيض فالاضطراب الناتج من الموجات الصوتية المنتقلة في الهواء يصبح على شكل كثافة نبضة هوائية. تأخذ هذه النبضات مكانها في اتجاه مسار الموجة ولذلك تسمى موجة طولية. وعندما تتحرك الموجة في وسط جامد، يمكن للموجات أن تكون عرضية وأيضًا طولية. وليس هناك نبضات طولية للموجات الكهرومغناطيسية.

وفي أي موجة ترتبط الطاقة بالنبضات. وينتج عن انتقال النبضات بواسطة الموجات «انتقال» الطاقة. وتنقل الموجات الكهرومغناطيسية طاقة كهرومغناطيسية. وتعتمد السرعة التي تنتقل بها على الناتج الذي نحصل عليه نتيجة حاصل ضرب E وB (مستخدمين قواعد خاصة لضرب المتجهات معًا). ومقدار الطاقة اللحظي المنتقل بواسطة موجة كهرومغناطيسية هو طاقة الحركة للشحنة الكهربية المتذبذبة التي تموِّج مجالها الكهربي. وتوليد الطاقة الكهرومغناطيسية كما تم وصفها أعلاه عملية تحويل طاقة الحركة إلى طاقة مشعة. (راجع الفصل الرابع.)

وبتطور النظرية الكهرومغناطيسية وأثير الكهرومغناطيسية المصاحب، أُثير السؤال حول ماذا يحدث للأثير عندما يتحرك جسم مثل الأرض خلاله. هل تستمر الأرض في حركتها دون إزعاج للأثير أم هل تسحب معها الأثير؟ فإذا لم تحدث الأرض أي اضطراب للأثير أثناء حركتها، إذن من الممكن استخدام الأثير كإطار مرجعي. وعندئذ من الممكن حساب القوة «الحقيقية» التي يبذلها المجال المغناطيسي على الشحنة المتحركة. وإضافة إلى ذلك، من الممكن حل المشكلة التي ما زالت تزعج الفلكين بصورة نهائية: أي الأجرام السماوية هي التي تتحرك فعلًا وأيها ساكن. ولكي يستخدم الأثير كإطار مرجعي، يجب أن يكون لدينا بعض المعرفة عن طبيعته الفيزيائية.

ويعتبر أن الأثير يملأ كل الفراغ، وحتى الفراغ الخالي لأن الضوء يتحرك عبر الفراغ الخالي. كما يعتبر أن ليس للأثير كتلة أيضًا. ولهذا يسمى الأثير غير قابل للوزن بدقة ثقيل Ponderous. وكان يعتبر أيضًا أنه لا يقدم أي مقاومة لحركة الأجسام خلاله، وإلا فإن الأجسام المختلفة الأوزان ستغير تدريجيًّا سرعتها وتصل إلى حالة السكون أو على أقل تقدير ستظهر بعض التغييرات التنظيمية لمدارها بمرور الزمن. وكون الموجات الضوئية موجات عرضية لذا لا بد أن يكون للأثير خواص مثل الجامد المرن. إذن تتطلب النظرية الرياضية للمرونة أن الأثير لا بد أنه مادة صلبة جدًّا لأن الموجات تتحرك بشكل أسرع في الأوساط الصلبة عن الأوساط اللينة. ولأن سرعة الموجات الكهرومغناطيسية كبيرة جدًّا بالمقارنة مع الموجات الأخرى (بمعامل يقترب من المليون)، فالصلابة المفترضة يجب أن تكون كبيرة جدًّا. ويجب على الأثير أن يكون في حالة سكون بالنسبة للفراغ المطلق، على الأقل في مناطق الفراغ بين الأجسام الفلكية المختلفة. وكان يعتقد أيضًا أن الأجسام الثقيلة الكبيرة ربما «تسحب» معها بعضًا من الأثير أثناء مسارها، بالرغم من أن هذا سيكون له تبعات معينة بالنسبة لانتشار الضوء في محيط الأجسام الثقيلة المتنوعة.

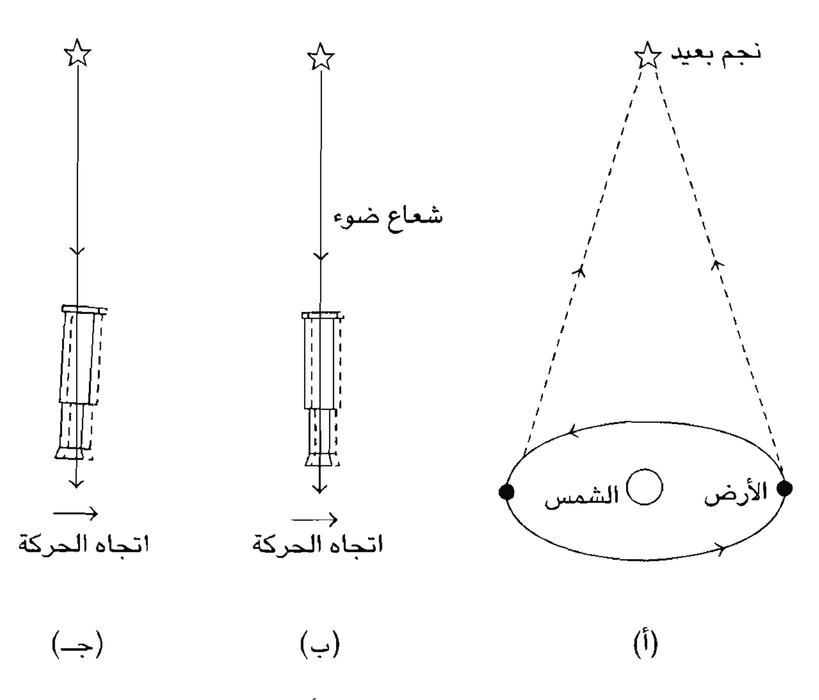
وعلى ضوء كل هذه الخواص، من الواضح أن الأثير يجب أن ينظر إليه كمادة عجيبة — أرقى كثيرًا عن أي شيء يخلقه الخيال العلمي! ولكن الأكثر أهمية فيما يعرض في هذا الفصل، أن الأثير (كما أشرنا آنفًا وبدأه أصلًا ماكسويل) يقدم إمكانية تمييز إطار مرجعي، إذا أمكن فقط تحديده.

محاولات اكتشاف الأثير

بالرغم من أن وجود الأثير قد يستدل عليه من الضرورة المنطقية أن يكون هناك وسط يدعم الموجات الكهرومغناطيسية إلا أنه من المرغوب فيه وجود بعض الأدلة أو التجارب المستقلة التي تحقق خواص الأثير. وهذا بالأحرى تاريخ طويل من المحاولات لاكتشاف الأثير.

وبدءًا من حوالي سنة ١٧٢٥ حاول الفلكي الإنجليزي جيمس برادلي أن يقيس المسافة بين الأرض والنجوم المختلفة مستخدمًا تقنيات مساحية قياسية. وبالنظر إلى نجم معين من نقاط مختلفة في مدار الأرض، توقع برادلي أن يميل بتلسكوبه بزوايا مختلفة. وبمعرفة زوايا الرؤية للنجم وقطر مدار الأرض وباستخدام الحسابات المثلثية البسيطة استطاع عندئذ أن يحسب المسافة إلى النجم (شكل ٦-٧(أ)). وقد جعلت هذه القياسات التلسكوبية من الممكن لبرادلي أيضًا التحقق من ظاهرة التغير الظاهري لموقع النجم: تعتمد زاوية الرؤية بين نجمين مختلفين على موقع الأرض في مدارها (راجع فصل ٢). إلا أنه عندما تمت المشاهدة بالتلسكوب بدا أن كل النجوم تتحرك في مدارات بيضاوية صغيرة، بصرف النظر عن بعدها عن الأرض. ووجد برادلي أنه من الضروري أن يميل بالتلسكوب مقدارًا إضافيًا في اتجاه حركة الأرض.

ونستطيع أن نرى تفسيرًا محتملًا للميل الإضافي للتلسكوب بمساعدة الأشكال (٦-٧(ب) و٦-٧(جـ)). فإذا لم تتحرك الأرض فسينتقل ضوء النجم مباشرة إلى منتصف أسطوانة التلسكوب — إلى العينية في القاع. إلا أن الأرض تتحرك، فعند وصول الضوء إلى العينية، ستكون العينية قد تحركت في اتجاه الحركة (إلى اليمين في الشكل)، ولن يمر عند ذلك ضوء النجم خلال منتصف العينية. ويبين الخط المستمر في الشكل ٦-٧(ب) موقع الضوء والتلسكوب لحظة وصول الضوء في التلسكوب، كما يبين الخط المتقطع المواقع عندما يصل الضوء إلى قاع التلسكوب. إلا أنه إذا أملنا التلسكوب حتى تصبح العينية «خلف» الفتحة عند قمة التلسكوب بشكل ما، فإن منتصف العينية سيصل إلى شعاع الضوء في نفس اللحظة التي يمر فيها الضوء كما يتبين من الجزء المتقطع بالشكل ٦-٧(جـ). (قارن مسلك شعاع الضوء بمسلك إسقاط جسم من ساري سفينة متحركة الذي تم شرحه من قبل في هذا الفصل.) تتناسب زاوية الميل مع نسبة سرعة التلسكوب (أي سرعة الأرض) خلال الأثير إلى سرعة الضوء، وهكذا فزاوية الميل هذه يمكن استخدامها لحساب سرعة الأرض بالنسبة للأثير.



شكل ٦-٧: انحراف وتغير الوضع الظاهري للنجم. (أ) تغير زاوية المنظر لنجم بعيد كما يرى من نقاط مختلفة من مدار الأرض. (ب) حركة التلسكوب عبر الأشعة القادمة من ضوء النجم. (جـ) ميل التلسكوب لمعادلة الحركة.

منذ حوالي مائة وخمسين عامًا بعد ذلك تم اختبار آخر لذلك التفسير. إذا امتلأت أنبوبة التلسكوب بالماء فمن المتوقع أن تتغير زاوية الميل بشكل هائل لأن الضوء يتحرك في الماء بسرعة تعادل ثلاثة أرباع سرعة الضوء في الهواء. وعليه كان من المتوقع أن تزداد زاوية الميل بمعامل ٣/٤ لكن، في الحقيقة، فإن زاوية الميل لم تتغير على الإطلاق. وأدت هذه التجربة إلى نتيجة أن الماء بطريقة ما «قد سحب» الأثير معه ليعوض التأثير المتوقع على زاوية الميل. ولقد دلت تجربة خاصة أجريت حوالي عشرين سنة قبل ذلك أن الماء المنساب من المؤكد أنه سيسحب الأثير معه لكن ليس بالقدر المطلوب لتفسير فشل التجربة.

وبدءًا من سنة ١٨٨١ بدأ أمريكي شاب يدعى ألبرت أ. مايكلسون سلسلة من التجارب، كان الغرض منها استخدام تقنية حساسة جدًّا لقياس حركة الأرض خلال الأثير للأغراض التجريبية، كان الشيء الهام هو قياس الحركة النسبية للأرض والأثير بمعنى أنه يمكن للمرء أن يتخيل أن الأرض كانت ساكنة وكان تيار من الأثير ينجرف ببطء متخطيًا الأرض حتى بالرغم من أنه كان مفهومًا أن الأرض «واقعيًّا»

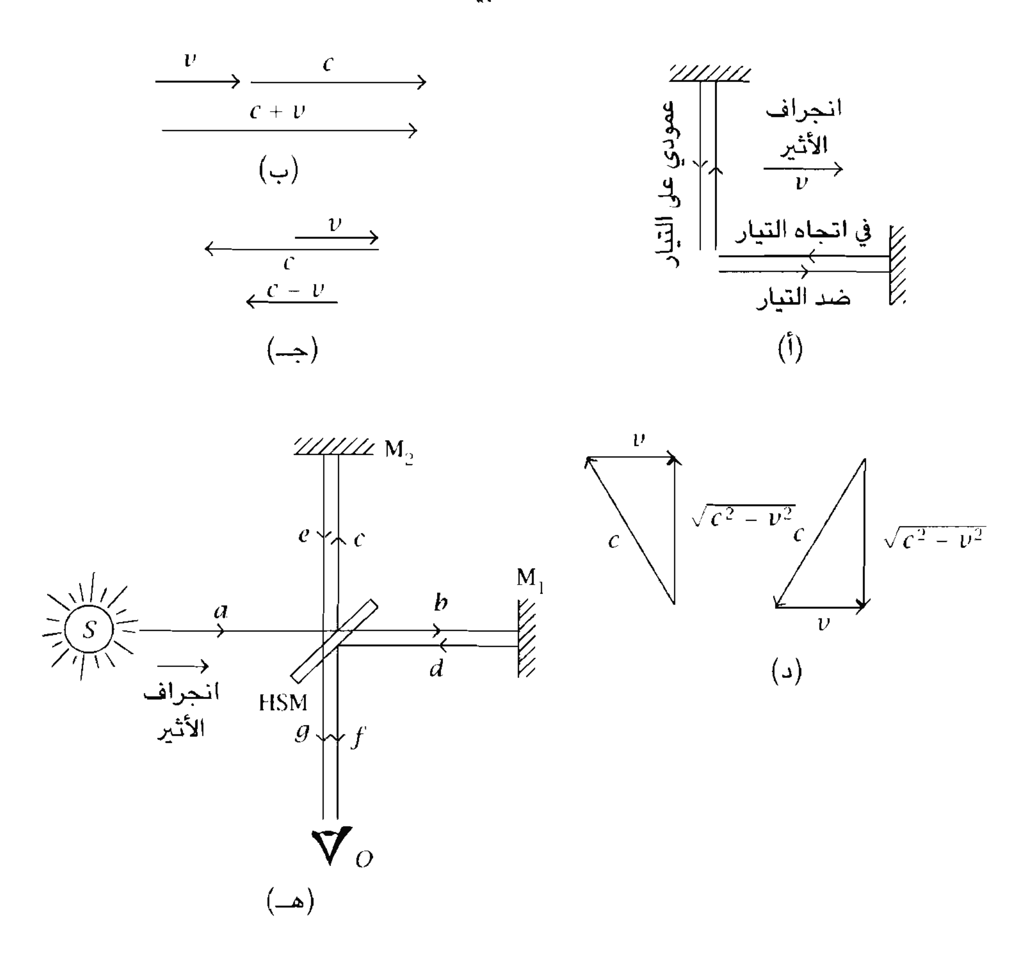
هي التي تتحرك خلال الأثير المستقر. ولهذا السبب فإن مثل هذه التجارب وتجارب أخرى مماثلة تسمى تجارب انجراف الأثير.

يمكن استيعاب المبادئ الرئيسية لمثل هذه التجارب بمضاهاتها برحلة الطائرة. تكون سرعة الطائرة الأرضية عندما يكون هناك رياح خلفية (سرعتها بالنسبة للأرض) أكبر من سرعتها إذا كانت تطير والهواء مستقر، وعندما تستدير وتطير عكس اتجاه الريح فإن سرعتها الأرضية تصبح أقل من سرعتها عندما تطير في هواء مستقر. الفرق في السرعة الأرضية عند الطيران في اتجاه الريح وعكس اتجاهه يساوي ضعف سرعة الريح. وفي تجارب مايكلسون، يلعب شعاع الضوء دور الطائرة ويلعب انجراف الأثير دور الريح. ولقد وجد مايكلسون أيضًا أنه من السهل أن نقارن بين تأثير الرياح المتعامدة* والتأثيرات ضد اتجاه الريح وفي اتجاه الريح.

ويمكن أن تفهم المبادئ التقنية لتجارب مايكلسون من الشكل ٦-٨. الفكرة هي أن نقارن بين مجموعتين من موجات الضوء: واحدة تعبر في اتجاه مواز لانجراف الأثير، والأخرى في اتجاه عمودي على انجراف الأثير. توجه مجموعة الموجات الأولى في اتجاه التيار إلى أن تصل إلى مرآة وعندها تنعكس ضد التيار. ومجموعة الموجات الثانية توجه عموديًّا على التيار إلى مرآة على نفس بعد مرآة اتجاه التيار ثم ترد ثانية. وعند مقارنة الوقت الفعلي لمجموعتي الموجات الذي تستغرقه كل منهما لتصل إلى المرآة الخاصة بها وتنعكس مرة ثانية إلى نقطة البداية، آخذين في الاعتبار تأثير سرعة انجراف الأثير على سرعة الضوء، وجد أن الناتج الكلي هو أن مجموعة الموجات التي تتحرك في اتجاه وضد اتجاه التيار تستغرق وقتًا أطول من تلك التي تقوم بالرحلة ذهابًا وإيابًا عموديًّا على التيار (مفترضين أن المرآتين على مسافة واحدة من نقطة البداية).

أجرى مايكلسون التجربة سنة ١٨٨١ أثناء خدمته كملحق بحري للولايات المتحدة في ألمانيا. وأعاد التجربة سنة ١٨٨٧ في كليفلاند (وكان يعمل في ذلك الوقت أستاذًا بمعهد كيس للتكنولوجيا) بمساعدة إدوارد مورلي الأستاذ بجامعة ويسترن ريزيرف. استخدما في تجربتهما أجهزة ذات حساسية تعادل عشرين ضعفًا لأجهزة ١٨٨١. واصل مورلي تكرار التجربة عبر فترة من الزمن في مواقع مختلفة من مدار الأرض. وتسمى التجربة الآن تجربة مايكلسون-مورلي.

*ريح تهب بزاوية قائمة على اتجاه طيران الطائرة.



شكل ٦-٨: تجربة انجراف الأثير. (أ) تتحرك أشعة الضوء موازية وعمودية على انجراف الأثير. (ب) متجه إضافي لسرعة «اتجاه التيار». (جـ) سرعات متجه إضافي «ضد التيار». (د) سرعات متجه «عمودي» على التيار. (هـ) تنظيم تخطيطي تجريبي. HSM مرآة نصف فضية، M_1 مرآة فضية كلية ١، M_2 مرآة فضية كلية ٢، S مصدر الضوء؛ O المشاهد، أ، ب، ج، د، هـ أشعة ضوء.

كانت حساسية الأجهزة المستخدمة سنة ١٨٨٧ كبيرة لدرجة أنها تستطيع اكتشاف تأثيرات أقل مما هو متوقع بمعدل ٤٠ مرة، ومع كل، لم تظهر النتائج أي اختلاف في رحلة الذهاب والعودة لكلا من المجموعتين من الموجات! ولقد أعيد إجراء التجربة بواسطة العديد من الباحثين الآخرين وبأجهزة ذات حساسية خمسة وعشرين مرة أدق من أجهزة سنة ١٨٨٧ إلا أنهم حصلوا على نفس النتائج.

وإحدى النتائج التي تستخلص من هذه التجارب، تسمى «لا نتيجة» لأنه لا يوجد اختلاف بين المجموعتين من الموجات، وهي أن الأرض تسحب معها بعضًا من الأثير بنفس الطريقة التي تسحب معها الطائرة بعضًا من الهواء أثناء رحلة طيرانها. وكما ذكرنا آنفًا، يبدو أن قياسات انحراف النجم باستخدام تلسكوب مملوء بالماء تبين أن الأثير يتم سحبه على طول سطح الأرض وبالقرب منه.

ولأن لا نتيجة لتجربة مايكلسون-مورلي تعني أن الأرض تسحب معها الأثير أثناء سيرها، كان من الواضح أن اختبارًا مباشرًا لفرضية سحب الأثير ضروري. وقد أعلن أوليفر لودج سنة ١٨٩٣ نتائج تجربة صممت لتنشيط سحب الأرض للأثير. فإذا وضعنا قرصًا صلبًا وثقيلًا جدًّا جدًّا في حالة دوران فإنه لا بد أن يجر الوسط المحيط به إلى حالة الدوران أيضًا. وإذا وضعنا قرصًا آخر ثابتًا وأقل كتلة أسفل القرص الدوار مباشرة فسينتج أثير يدور فوق سطحه مباشرة. ثم رتب لودج مجموعة من المرايا على القرص الأول لينتج مجموعتين من موجات الضوء، واحدة تدور في اتجاه عكس اتجاه عقارب الساعة حول القرص الأدنى، والأخرى في اتجاه مسار عقارب الساعة. تتحرك إحدى مجموعتي الموجات في نفس اتجاه الانجراف الصناعي للأثير وبذلك ستزداد سرعته بالنسبة للمرايا، بينما ستقل سرعة المجموعة التي تتحرك في عكس الاتجاه. ويمكن إذن مقارنة مدة التحرك لمجموعتي الموجات من خلال ظاهرة التداخل (راجع فصل ٧)، ويمكن أيضًا قياس مدى سحب الانجراف الاصطناعي. وعلى النقيض من النتيجة المتوقعة من تجربة مايكلسون-مورلي كانت النتيجة أيضًا لانتيجة! ولم يكتشف أي اختلاف بين موجات الضوء الدوارة ذات الاتجاهات المتعاكسة.

وقد أظهرت تجربة مايكلسون-مورلي أن انجراف الأثير لا يمكن كشفه (حركة الأرض خلال الأثير). وبينت تجربة لودج أن القياس المباشر لسحب الأثير عن طريق جسم كثيف الكتلة متحرك لا يمكن تقديره كذلك. ويبدو أن هاتين التجربتين تناقض إحداهما الأخرى. وفي الواقع لم تنجح أي من التجربتين في إثبات وجود الأثير. وأكثر من ذلك لم تنجح أي تجربة أخرى في إظهار انجراف أو سحب الأثير أو حتى وجود الأثير. فمثلًا إذا كان هناك زوج من الألواح المتوازية، واحد عليه شحنة موجبة والآخر عليه شحنة سالبة، ومعلقان بخيط رفيع في ريح من الأثير، فيجب أن يؤدي هذا إلى ظهور طوق يلوي اللوحين المعلقين. إلا أن التجربة لم تظهر مثل هذا العزم.

النظرية النسبية الخاصة

بالإضافة إلى المشاكل التجريبية التي لم تحل بالنسبة لتقدير حركة الأرض خلال الأثير أو حتى اكتشاف الأثير، توجد أيضًا مشاكل نظرية أساسية. وتتطلب نسبية جاليليو-نيوتن أن تكون القوى كلها متساوية (غير متغيرة، في كل أطر القصور الذاتي المرجعية.) إلا أنه كما تمت الإشارة من قبل، يبدو أن القوة المؤثرة على الشحنات الكهربية المتحركة تكون مختلفة في أطر القصور الذاتي المرجعية المختلفة. فمثلًا إذا كانت شحنتان موجبتان وكلاهما تتحرك بنفس السرعة وفي نفس الاتجاه، فعندئذ وفقًا للنظرية الكهرومغناطيسية، سينتج مجال مغناطيسيّ يؤثر على الشحنات المتحركة، مسببًا قوة تجاذب بينهما. تزداد هذه القوة كلما زادت السرعة. إلا أن السرعة كمية نسبية، وتعتمد على الإطار المرجعي، وهكذا فقوة التجاذب نسبية وتعتمد على الإطار المرجعي، وهذا يتعارض مع متطلبات نسبية جاليليو-نيوتن. ويمكن النظر إلى محاولات حل هذه المشكلات وأخرى مشابهة وأيضًا مشكلات مثل تلك التي أثارها فشل تجارب الأثير على أنها بشير لحل أينشتاين للمشكلة.

وفي سنة ١٨٩٢ اقترح عالما الفيزياء فيتزجيرالد في أيرلندا ولورنتز من هولندا كل على حدة حلًّا للمعضلة التي أوجدتها تجربة مايكلسون-مورلي. اقترح هذان العالمان أن الجزء الذي جرت فيه حركة مجموعة الموجات المتحركة في اتجاه وعكس اتجاه التيار (المسار الأفقي في الشكل ٦-٨) أصبح أقصر بمقدار يعادل فقط الزمن الإضافي المطلوب لحركة الضوء للانتقال في ذلك المسار. وهكذا فلن يستغرق الضوء أي زيادة في الوقت ليتحرك في اتجاه التيار والعودة، وبذلك تم تفسير اللانتيجة. ويمكن قبول معقولية هذا التفسير بالقول إن التحرك خلال الأثير ينتج عنه ضغط مقاومة، الذي يضغط الأجهزة تمامًا مثل ما يحدث للزنبرك عندما ينضغط بدفعه في مواجهة قوة مقاومة. ومن الضروري أن يكون مقدار الانكماش (التناقص) ضئيلًا جدًّا، حوالي نصف جزء من المليون من ١٪ لدرجة أنه عادة لا يمكن ملاحظته. إلا أن، تجربة مايكلسون-مورلي كانت من الدقة حتى إنها كافية لكشف مثل هذا التأثير الطفيف.

استطاع لورنتز (١٨٩٩) فيما بعد تبرير هذا الانكماش المقترح وذلك بالإشارة إلى أنه جاء نتيجة لبعض الأفكار التي كان يفكر فيها ولها علاقة بمشكلة الطبيعة النسبية للقوة بين الشحنات الكهربية المتحركة. كان لورنتز يبحث في بعض معادلات للتحول بين أطر القصور الذاتي المرجعية المختلفة، التي تجعل صيغ القوة الكهرومغناطيسية

غير متغيرة. وكانت إحدى تبعات المعادلات الانتقالية الجديدة، والتي تعرف بتحولات لورنتز، هي أن الأجسام المتحركة قد تنكمش بمقدار يتوقف على سرعتها. ولقد وجد لورنتز أيضًا أن الفترات الزمنية المقاسة للأجسام المتحركة تصبح أكبر مما كان متوقعًا. وأطلق على تلك الفترة من الزمن الممتد الزمن المحلى.

اقترح العالم النظري الفرنسي، هنري بونكاري، سنة ١٩٠٤ أنه من غير المجدي محاولة قياس حركة الأرض — أو أي شيء آخر — بالنسبة للأثير، وذهب لأبعد مما ذكره لورنتز، مستخدمًا استحالة قياس السرعة بالمنظور المطلق، وبين أن كتلة أي جسم (أي، القصور الذاتي، أو جانب من الكتلة يلعب دورًا في قانون نيوتن الثاني للحركة) تزداد بزيادة حركته. ولقد أظهر أيضًا أن هناك نهاية عظمى لسرعة أي جسم: سرعة الضوء.

وتتضمن النظرية النسبية الخاصة لأينشتاين كل هذه الأفكار. ومن أهم نتائج أعمال أينشتاين أنه كان قادرًا على أن يبين ببساطة وبطريقة مباشرة (على الأقل من وجهة نظر الفيزيائيين) أنها تتابعات طبيعية لإعادة اختبار عميقة ثاقبة لبعض الافتراضات الأساسية عن طبيعة القياسات الفيزيائية، بينما قدمها فيتزجيرالد ولورنتز لكي يتناولوا مشكلة معينة. وكان تفكير أينشتاين متأثرا بشكل كبير بإرنست ماتش عالم الفيزياء والفيلسوف النمساوي الذي قام بإجراء اختبارات حاسمة ودقيقة لمبادئ إسحاق نيوتن. كان ماتش واحدًا من مؤسسي مدرسة الوضعية المنطقية للفلسفة وكان منتقدًا بصفة خاصة لتعريفات نيوتن للمكان والزمان المطلقين وللكتلة. (لم يكن طبعًا ماتش هو أول من انتقد أعمال نيوتن. كان الفيلسوف الألماني لايبنتز Leibnitz معاصرًا وغريمًا لنيوتن، وكان منتقدًا لنفس التعريفات.)

كانت الظروف المحيطة بتطور الفيزياء في بداية القرن العشرين مماثلة بعض الشيء لتلك الأيام التي عاش فيها إسحاق نيوتن. وكان العديد من العلماء النابغين جدًّا على وشك الوصول إلى تقدم هائل في كل مجموعة من المشاكل التي أصبحت ناضجة للحل، لكن واحدًا منهم فقط، هو أينشتاين وكان وقتها واحد آخر فقط هو نيوتن — كان كل منهما قادرًا على تسيد الموقف. وعلى سبيل المثال فسر الاختزال الظاهري للورنتز-فينتزجيرالد فشل تجربة مايكلسون-مورلي، وفي الواقع هناك صورة مطورة لتلك التجربة (تسمى تجربة كنيدي-ثورندايك) المصممة لتحيط باختزال لورنتز-فيتزجيرالد ولتعطي أيضًا لانتيجة. وأكثر من ذلك، كما سنرى فيما يلي، لقد قدم منهج أينشتاين تفسيرًا مختلفًا كلية لفشل كل تجارب الأثير.



شكل ٦-٩: أينشتاين سنة ١٩٠٥ (تم إنتاجها بإذن من لوت جاكوبي، هيل سبور ونيوهامبشاير).

من الممكن القول إنه ليس هناك أي عالم — ما عدا ربما إسحاق نيوتن — كانت له شهرة ألبرت أينشتاين (١٨٧٩–١٩٥٥). وحتى بعد ثلاثة عقود من موته، ما زال مشهورًا بشعره الأبيض وشاربه المتدلي وبنيته المقوسة وقامته المنحنية ورقته غير المتكلفة تمامًا مثل شهرة نظرياته العلمية. (شكل ٦-٩ يظهر أينشتاين كشاب، عندما بدأ يضع بصمته في دنيا العلم.) وكما هي الحقيقة حول المشاهير من الناس هناك العديد من الأمور الغامضة وسوء الفهم حوله وحول أعماله. وبالرغم من أنه بدأ كطفل يتكلم متأخرًا عن العادة إلا أن مقدراته العامة كانت واضحة حتى وهو طفل. لم يكن مستواه متميزًا في مقررات المدرسة التي لم تثره مثل الأمور التي كان يجد متعة فيها، لكنه وجد أنه عندما كان عليه إتقان بعض المواد ليفي بمتطلبات المدرسة التي يريد الالتحاق بها، كان يفعل ذلك فورًا. كان يكره النظام الصارم لكنه كان قادرًا على تنظيم أموره بشكل جيد. لم يكن نابغًا في علوم الرياضيات لكنه كان كفئًا في الرياضيات التي يحتاجها.

وقد قدم إسهامات هامة في العديد من مجالات الفيزياء بجانب النظرية النسبية، ناشرًا أكثر من ٣٥٠ مقالًا علميًّا في حياته. لم تكن كل أبحاثه في الفيزياء النظرية،

بل إنه حتى قد سجل بعض براءات الاختراع. وعلى خلاف جوليوس روبرت ماير الذي وجد صعوبة كبيرة في توصيل أفكاره الهامة عن الطاقة كان أينشتاين ناجحًا تمامًا في توصيل معظم أفكاره الأكثر إثارة للجدل. وقد اشترك بحماس في المجادلات العلمية أيامه بكثير من الدعابة.

ولم يتردد في الحديث في الأمور السياسية التي كان يعتبرها هامة. ولقد اعتذر لاستخدامه النظرية النسبية الفيزيائية لتبرير الأخلاقيات النسبية، فقط لأن مثل هذا الاستخدام يفضح عدم فهم لحقيقة النظرية.

وفيما يتعلق بالنظرية النسبية، يتساءل بعض الناس عن تفرد إسهامات أينشتاين. فقد أقر هو نفسه بذلك بالنظر للاحتياجات العلمية لذلك الزمن، فقد كان من المحتمل أن يطور بوانكري نظرية النسبية إذا لم يفعل ذلك أينشتاين. وعلى كل، فلقد أعلن أنه بدأ التفكير حول الأمور المتعلقة بالنظرية النسبية عندما كان في السادسة عشرة من عمره. وأكثر من ذلك، كان منهج أينشتاين لطرق الموضوع يتميز بأنه مباشر وكيس وأحدث ما يكون في الأفكار الأساسية. والنظرية النسبية العامة المشروحة فيما بعد في هذا الفصل، معترف بها عالميًّا بأنها استحداث أينشتاين الفريد.

وبينما كان أينشتاين يعمل سنة ١٩٠٥ كفاحص في مكتب تسجيل الاختراعات بسويسرا نشر ثلاثة أبحاث هامة، كان عنوان أحدها «حول الديناميكا الكهربية للأجسام المتحركة» (البحثان الآخران مذكوران في الفصل ٤ والفصل ٧). لم يكن معنيًّا كثيرًا في ذلك البحث بالكميات النسبية التي تعتمد مقاديرها على الإطار المرجعي الذي منه تم قياسها، بل على الكميات الثابتة التي قد تكون متساوية في كل أطر القصور الذاتي المرجعية. وعدد مبدأين خاصين يجب استخدامهما في كل الأطر المرجعية:

(١) كل قوانين الفيزياء ثابتة في كل أطر القصور الذاتي المرجعية.
وهذا يعني أن كل الصيغ المعبرة عن قوانين الفيزياء المتنوعة لا بد أن يتم حسابها بنفس الوسيلة في كل أطر القصور الذاتي المرجعية.

(٢) قانون الفيزياء الذي ينص على أن سرعة الضوء في فضاء خال هي نفسها في كل أطر القصور الذاتي المرجعية، ولا تعتمد على المصدر أو على من يرصد الضوء.

أشار أينشتاين بأن هذا يعني أن الأثير لا يمكن تحديده بأي وسيلة تجريبية، وعليه فإنه مفهوم غير ذي جدوى ويجب إهماله.

وينص المبدأ الأول ببساطة أن مبدأ النسبية يوجد فعلًا كما أشار جاليليو ونيوتن وآخرون أصلًا. ولقد أكد بصفة خاصة بأن مبادئ الفيزياء هي نفسها في كل مكان. وأن المبدأ الثاني هو النظرة الفيزيائية الثاقبة الهامة الجديدة.

إن ثبات سرعة الضوء هو نتيجة هامة لكل التجارب الموجهة لتحديد الأثير. وتؤكد أيضًا تلك التجارب، وبنفس الأهمية، على فكرة جاليليو عن أنه ليس من الممكن تحديد الحركة المطلقة. وهذا يعني أيضًا أن القياسات بإطار مرجعي معين صحيحة كما هي بأي أطار مرجعي آخر. وتعتبر أسئلة مثل «بأي سرعة حقيقية تتحرك الأرض؟» غير ذات معنى.

وكونه متأثرًا بماتش، أيقن أينشتاين أنه من الضروري أن نقر معنى المكان والزمان وكيف يقاس ونعترف أن المكان والزمان ليسا أمرين مستقلين عن بعضهما، لكنهما بالضرورة مرتبطان. وفوق ذلك فهما مفهومان معرفان بالقياس. فمثلًا، يقاس الزمن بمراقبة تحرك عقارب الساعة أو بمرور أجسام ثقيلة في السماء. ونعرف أن زمنا قد انقضى لأننا نرى الأجسام قد غيرت موقعها في الفضاء. وسرعة الضوء متضمنة لأن هذه المشاهدات تمت عن طريق حقيقة أن الضوء يتحرك من الأجسام المتحركة إلى أعيننا. (من غير المهم إذا كانت الإشارات الكهربية تستخدم لتدلنا أن الأجسام تتحرك: فمثل هذه الإشارات تتحرك أيضًا بسرعة تساوي سرعة الضوء كما تبين من النظرية الكهرومغناطيسية.)

وقد بين أينشتاين في سياق الكلام، أن الزمان والمكان قابلان للتبادل، كما هو موضح في مجموعة المقولات التالية، التي تعرض تماثل المكان والزمان:

(١) سيرى المشاهد المستقر لنظام متحرك أن الأحداث التي تجري في نفس المكان في أوقات مختلفة للنظام المتحرك تحدث في أماكن مختلفة في النظام المستقر.

(٢) سيرى المشاهد المستقر لنظام متحرك أن الأحداث التي تجري في نفس الوقت في أماكن مختلفة للنظام المتحرك تحدث في أوقات مختلفة في النظام المستقر.

(٣) سيرى المشاهد المستقر لنظام متحرك يحدث في نفس الزمان ونفس المكان نظامًا متحركًا يحدث عند نفس الزمان ونفس المكان في النظام المستقر.

استخلصت المقولة ٢ من المقولة ١ باستبدال كلمة الزمان والمكان. ويغير هذا التبادل معنى المقولة. وعلى الجانب الآخر، فتبادل كلمات الزمان والمكان في المقولة الثالثة ٣ لا يغير معنى هذه المقولة.

ولتوضيح هذه المقولات، سنفرض أن النظام المتحرك طائرة ترحل من نيويورك إلى لوس أنجلوس، والنظام المستقر هو برج مراقبة الطائرة على الأرض. وليكن هناك مسافر على الطائرة يجلس في المقعد رقم 10C. وتم تقديم شراب عصير البرتقال للراكب في الساعة ٨:٠٠ صباحًا بينما كانت الطائرة فوق مدينة ألباني بولاية نيويورك، وعند الساعة التاسعة كان الراكب يشرب فنجانًا من القهوة بعد تناول الإفطار بينما كانت الطائرة تحلق فوق مدينة شيكاغو. ففي النظام المتحرك، أيْ الطائرة، كلا الحدثين تمَّ في نفس المكان، أيْ المقعد 10C، لكن في أزمنة مختلفة. وفي النظام المستقر، الأرض، تم الحدثان عند مكانين مختلفين، فوق ألباني وفوق شيكاغو، كما يمكن رؤيتهما بواسطة مشاهد في برج المراقبة إذا استطاع أن ينظر داخل الطائرة.

والسيناريو المذكور مقبول تمامًا، لكن السيناريو المبني على المقولة الثانية غير قابل للتصديق: فبعد مضي بعض الوقت وفوق مدينة دينفر بكلورادو ينظر الراكب، الذي كان يقرأ في كتاب للفيزياء أمامه فيرى ضابطًا فيدراليًّا في مقدمة الطائرة، ومختطفًا للطائرة في مؤخرتها، وكل منهما موجهًا مسدسًا تجاه الآخر. وتم إطلاق الرصاص من المسدسين في نفس الوقت كما رأى ذلك الركاب. إلا أنه وبالنسبة لمشاهد في برج المراقبة على الأرض يرى الطلقات صدرت لكن ليس في نفس الوقت، وبالرغم من أن الأمر غير قابل للتصديق كما يرى، إلا أن السيناريو المبني على المقولة الثانية صحيح.*

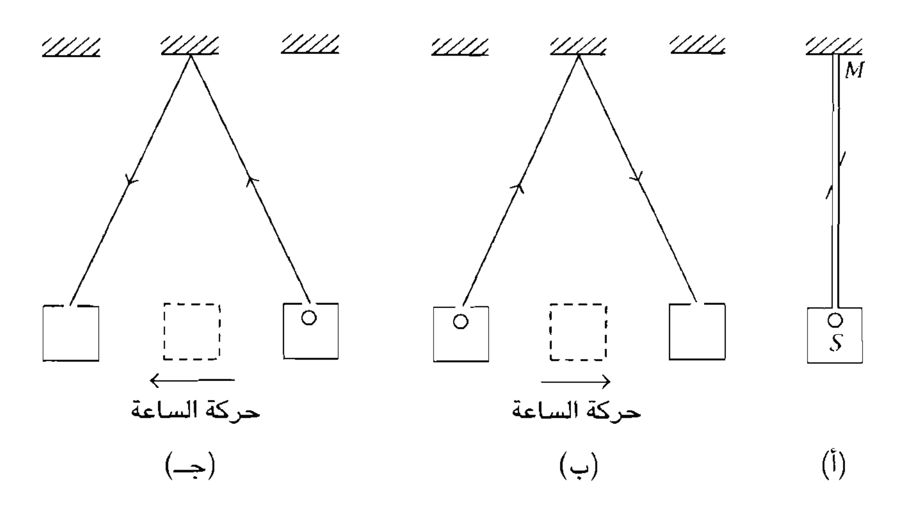
وفي سيناريو ثالث، وبعد إخفاق كلا الطلقتين في إصابة الهدف، يلاحظ الراكب أن المضيف الواقف بجوار مقعده يشهق ويسقط منه إناء القهوة في حجره في المقعد 10C. ويرى رئيس شركة الطيران الذي يراقب من برج المراقبة، بالفعل أن المضيف شهق في نفس اللحظة وأسقط إناء القهوة في حجر الراكب فوق مدينة دينفر.

*الفترة الزمنية بين الطلقتين صغيرة جدًّا جدًّا، وبالتأكيد أنها أقل كثيرًا من التفاعل البشري على طائرة تطير بسرعة عادية. لكن إذا كانت سرعة الطائرة عالية ولنقل نصف سرعة الضوء فإن الفترة الزمنية بين الطلقتين يمكن ملاحظتها تمامًا بواسطة المشاهد في برج المراقبة.

والنقطة المراد إيضاحها هي أنه لأن المكان والزمان متداخلان فهما كميات نسبية وأنهما مختلفان في أطر قصور ذاتي مختلفة. والأحداث التي تحدث في لحظة ما في وقت ما في إطار مرجعي معين ليست بالضرورة لحظية في الزمن في إطار مرجعي آخر. وستكون فقط لحظية في كل أطر القصور الذاتي المرجعية إذا كانت الأحداث اللحظية تحدث في نفس المكان كما في السيناريو الثالث.

وقد أظهر أينشتاين أن الفترات الزمنية بين حدثين يمكن قياسها بشكل مختلف في ظروف أطر قصور ذاتي مختلفة. حتى إن ساعتين كانتا متماثلتين ستسيران بمعدلين مختلقين في إطارين مرجعين مختلفين، بمعنى أن الزمن بين دقة ودقة سيكون مختلفًا. ويمكن توضيح ذلك بمثال بسيط يطلق عليه مرآة ساعة، ومبين بالشكل ٦-١٠(أ)، الذي فيه مصباح كهربي داخل صندوق به ثقب يمكن غلقه، ومرآة موضوعة على بعد ٩٣٠٠٠ ميل فوق الثقب، فإذا كان الثقب يفتح ثم يغلق بين لحظة وأخرى، ستصل ومضة من الضوء إلى المرآة بعد نصف ثانية ثم تنعكس ثانية إلى الثقب المغلق لتصل لكن بعد نصف ثانية أخرى. لقد وقع الحدثان: (١) إنبعاث ومضة الضوء من الثقب، و(٢) عودة ومضة الضوء إلى نفس الثقب المغلق بعد مرور ثانية. هذه المرآة الساعة إذن ساعة زمنية تحدد ثانية واحدة فقط.

إذا صنعت ساعتين مثل هذه الساعة، ووضعت واحدة في إطار قصور ذاتي مرجعي (أ) والأخرى توضع في إطار قصور ذاتي مرجعي (ب). ويتحرك الإطاران المرجعيان بسرعة ثابتة كل منهما بالنسبة للآخر. وكما رأينا، فكل ساعة تعمل بصورة تامة بالنسبة لإطارها المرجعي (سرعة الضوء ثابتة في كل الأطر المرجعية). إلا أنه وكما رأينا من وجهة نظر الإطار المرجعي الآخر فكل ساعة تعمل بطيئة كما تبين من شكل ٦-١٠(ب). تتحرك الساعة في الإطار المرجعي (أ) عند رؤيتها من (ب) بسرعة v. وأثناء نصف الثانية التي تستغرقها حركة الضوء من الثقب في الصندوق إلى المرآة، تكون المرآة قد تحركت من موقعها الأصلي على اليسار في الشكل إلى الموقع المتقطع في مركز الشكل. وحينئذ عند الرؤية من (ب) يكون شعاع الضوء قد تحرك إلى أعلى في مسار قطري حتى ينعكس ثم إلى أسفل في مسار قطري أيضًا. (لاحظ التشابه بين هذا الموقف وذلك الجسم الذي سقط من الساري في سفينة متحركة، الذي ناقشناه آنفًا). بالنسبة لمشاهد في الإطار المرجعي (ب) فإن ومضة الضوء في ساعة الإطار المرجعي (أ) قد تحركت مسافة أطول عن ومضة الضوء في ساعته الثابتة. وحيث إن سرعة الضوء ثابتة في كل الأطر المرجعية (المبدأ



شكل ٦-١٠: أشعة الضوء في الساعة المرآة. S مصدر الضوء، M المرآة. (أ) ترى الإطار المرجعي الذي فيه الساعة في سكون. (ب) الساعة في إطار مرجعي (أ) كما ترى من الإطار المرجعي (ب). (جـ) الساعة في الإطار المرجعي (ب) كما ترى من الإطار المرجعي (أ).

الخاص الثاني لأينشتاين)، فإن الفترة الزمنية بين الحدثين — انبعاث ومضة الضوء وعودتها — لن تكون ثانية واحدة للساعة المتحركة بل تكون زمنًا أطول بعض الشيء. الساعة المتحركة تتحرك أبطأ!

والعنصر الحاسم في هذا التحليل هو افتراض أن سرعة الضوء ثابتة في كلا الإطارين المرجعيين. هذه هي الحقيقة الجديدة الهامة المشار إليها بواسطة النظرية النسبية الخاصة لأينشتاين، وهي بالتبعية تقود إلى بعض التنبؤات المعينة التي يمكن التحقق منها تجريبيًّا.

تُحسب الفترة الزمنية المقاسة بواسطة الساعة المتحركة بقسمة ثانية واحدة على $\sqrt{1-(v/c)^2}$، حيث v هي السرعة النسبية للأطر المرجعية، وc سرعة الضوء (يمكن تبرير هذه الصيغ بحسابات هندسية بسيطة.) فمثلًا إذا كانت النسبة v/c هي ٣/٥، تكون الفترة الزمنية على الساعة المتحركة كما يراها الملاحظ من (ب) تساوي ١٫٢٥ ثانية. وتفقد الساعة المتحركة ٠٫٢٥ ثانية لكل ثانية.

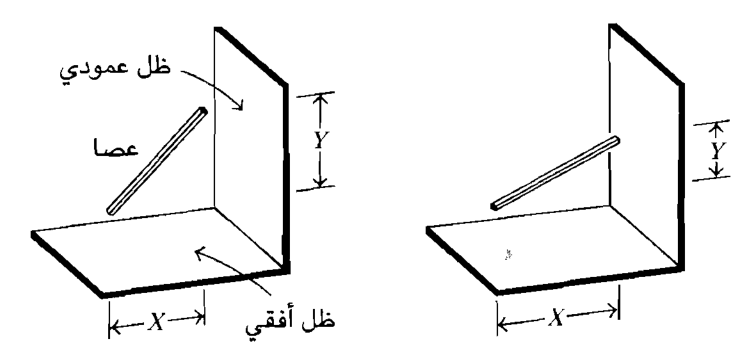
وعلى كل فمشاهد من الإطار المرجعي (أ) يرى الموقف مختلفًا تمامًا. فبالنسبة إلى (أ) الساعة في (ب) هي التي تتحرك (شكل ٦-١٠(جـ)) والساعة في (ب) تسير ببطء. وهنا ليس هناك تناقض، فالمشاهد في الإطار المرجعي (أ) «يرى» فترات الزمن بين الأحداث مختلفة عن المشاهد في (ب). وحيث إن كل التحركات نسبية يقول كل

مشاهد إن كل إطار مرجعي يخصه يكون في حالة سكون، وإن الإطار الآخر يتحرك بالنسبة له. وكلا المشاهدين يمكنهما الإدعاء وهما على حق أن الساعة في الإطار الآخر هي التي تسير ببطء. هذا التناقض الظاهري للادعاءات المتناقضة والمتساوية في صحتها سيتم مناقشته وتوضيحه أكثر فيما بعد.

وقد أطلق علي الظاهرة التي تظهرها الساعة بطيئة الحركة تمدد الزمن. وهناك تأثير آخر يشاهد في أطر القصور الذاتي المرجعية ويسمى تقلص الطول، وهو مشابه لتقلص لورنتز-فيتزجيرالد. إذا وضعنا عصا قياس في إطار مرجعي (أ) وعصا قياس أخرى مشابهه وضعت في أطار مرجعي آخر (ب)، لن تتأثر أي من العصاوين بالحركة عند رؤيتهما من قبل المشاهدين في نفس الإطار المرجعي مع كل عصا. إلا أنه إذا وضعت العصاوان متعامدتين إحداهما على الأخرى وعلى اتجاه الحركة النسبية للإطارين المرجعيين، فعندما يقيس المشاهد في (أ) العصا (ب) ويقارنها بعصاه أو عصاتها فسيبدو أن العصا في (ب) أقصر. وبالمثل عندما يقيس المشاهد في (ب) العصا (أ)، ستبدو العصا في (أ) أقصر. أيُّ العصاوين أقصر فعلًا؟ كلاهما! (وكجواب بديل ليس أي منهما. والسؤال في الحقيقة ليس له معنى، كما سنرى في المقاطع القليلة القادمة).

سيجد كلا المشاهدين أن العصا الأخرى (تلك التي تكون في حركة نسبية بالنسبة للإطار المرجعي) قد خضعت لتقصير في الطول. وتحتفظ العصا الموجودة في حالة سكون بالنسبة للإطار المرجعي بطولها الصحيح. وعندما توضع العصاوان عموديتين على اتجاه حركة الأطر المرجعية، فمرة ثانية لن يكون هناك تغير في الأطوال (إلا أنهما سيكونان أقصر عند المشاهدة من الإطار المرجعي الآخر). وسيخضع أي جسم في حالة حركة في إطار مرجعي إلى تقلص في هذا البعد الذي يكون موازيًا لاتجاه الحركة.

تظهر العلاقة المتداخلة بين تمدد الوقت وتقلص الطول أكثر وضوحًا بإدخال الزمن كبعد رابع، بدلًا من اعتبار المكان والزمان كينونات متمايزة، ويجب أن ينظر إليهما كأشياء مختلفة لكينونة موحدة تسمى الزمكان. فبدلًا من مناقشة موقع معين في مكان أو نقطة معينة في الزمن، فمن المفيد أكثر اعتبار الأحداث في الزمكان. ويتحدد الحادث عن طريق وصفه بكل من أين ومتى حدث أو سيحدث. ففي المكان وحده تقاس المسافة بين الموقعين. أما في الزمن وحده فتقاس فترة الزمن المنصرم بين وقوع الحدثين. إلا أنه في حالة الزمكان تقاس الفترة الزمكانية بين الحدثين.



شكل ٦-١١: الظلال الأفقية والرأسية X وY لعصا. ويمكن حساب طولها من $\sqrt{X^2 + Y^2}$ بصرف النظر عن زاوية العصا.

وإحدى الطرق لفهم ذلك أن ننظر إلى تشابه العلاقة بين العصا وظلالها (راجع الشكل ٦-١١). إذا وضعت عصا بحيث تصنع زاوية مع سطح الطاولة الأفقي ومستندة على الحائط، فستلقى بظلالها على الطاولة وعلى الحائط عندما يسلط عليها الضوء بطريقة صحيحة. فإذا أضيئت العصا من أعلى، فسيظهر ظل أفقي على المنضدة، وإذا سلطت الإضاءة من الجانب، فسيظهر ظل رأسي على الحائط. وسيعتمد الظل على الطاولة وعلى الحائط وعلى الزاوية التي وضعت بها العصا. فإذا كانت العصا تقترب من أن تكون رأسية فظل الطاولة سيكون قصيرًا وظل الحائط طويلًا، بينما إذا كانت العصا تقترب من أن تكون أفقية، فظل العصا سيكون طويلًا على الطاولة وقصيرًا على الحائط. ويكون طول العصا غير متغير (ثابتًا)، وستتغير ظلالها فقط بتغير زاويتها.

وإذا كان من المتعذر قياس طول العصا بطريقة مباشرة، فمن الممكن قياس الطول الفعلي من أطوال الظلين. فإذا كان طول الظل على الطاولة X وطول الظل على الحائط Y، عندئذ ووفقًا لنظرية فيثاغورس يكون طول العصا $\sqrt{X^2 + Y^2}$. فطول العصا سيظل دائمًا هو نفسه مهما كانت زاوية العصا والنتائج لكل من Y وX، لأن طول العصا ثابت مهما كانت الزاوية.

وعندما تجرى القياسات، بمدلول الزمكان، للمسافة بين حدثين والوقت المنصرم بين هذين الحدثين تكون الكميات المقاسة هي «ظل-المكان» و«ظل-الزمن» لفترة الزمكان بين الحدثين. وقد بين أينشتاين أنه إذا كانت T هي الزمن المنصرم، وL هي المسافة بين الحدثين وc هي سرعة الضوء فتكون فترة الزمكان بين الحدثين تساوي

$\sqrt{c^2T^2 - L^2}$. ويمكن قياس T وL بواسطة مشاهدين مختلفين في أطر مرجعية مختلفة للحصول على قيم مختلفة (ويعبر هذا عن تغيير زاوية العصا)، ولكن عند حساب فترة الزمكان باستخدام قياساتها، ستحصل كلها على نفس النتائج العددية. وتكون فترة الزمكان ثابتة ولا تتغير من إطار قصور ذاتي مرجعي إلى إطار قصور ذاتي مرجعي آخر.

فترة الزمكان لا يمكن قياسها مباشرة، لكن يمكن حسابها عن طريق القياسات. «فظل-المكان» و«ظل-الزمان» هي كميات يمكن قياسها، لكن قيم القياسات نسبية. إنه أمر ليس له معنى أن تسأل ما الفترة الزمنية الصحيحة أو ما المسافة الصحيحة بين حدثين، تمامًا مثل السؤال عن «الطول الحقيقي» لظل الجسم.

كان لهذه المفاهيم الجديدة للمكان والزمان التي قدمها أينشتاين عدد من التداعيات. كان قادرًا من هذه المفاهيم أن يبين أنه من الضروري استخدام معادلات التحولات الجديدة التي كان قد اقترحها لورنتز. ولقد أدت تلك المعادلات، تحولات لورنتز، إلى معادلات جديدة لحساب السرعات النسبية للأجسام في أطر مرجعية مختلفة. قدمنا في أوائل هذا الفصل مثالًا لكرة تم قذفها إلى الأمام بسرعة ٦٠ ميلًا في الساعة بالنسبة لسفينة تبحر بسرعة ٣٠ ميلًا في الساعة بالنسبة للمحيط. فسرعة الكرة بالنسبة للمحيط إذن هي ٩٠ ميلًا في الساعة. ففي مدلولات جبرية، ذلك إذا كانت سرعة الكرة بالنسبة للسفينة u وأن سرعة السفينة بالنسبة للمحيط هي v وسرعة الكرة بالنسبة للمحيط هي $v + u$ وفقًا لتحولات جاليليو، التي هي المعادلات التحويلية التي استخدمها جاليليو ونيوتن وأتباعهما. إلا أنه وفقًا لتحولات لورنتز، فسرعة الكرة بالنسبة للمحيط تعطى بواسطة $(u + v)/(1 + uv/c^2)$، حيث c هي سرعة الضوء. وعن طريق إجراء الحسابات وفقًا للمعادلات الجديدة، التي تسمى معادلة السرعة المضافة، فإن سرعة الكرة بالنسبة للمحيط ستكون أقل من ٩٠ ميلًا في الساعة، لكن بمقدار ٠,٤ من مليون مليون بالمائة. والاختلاف بين الحساب بالطريقتين ضئيل لا يمكن قياسه في هذه الحالة.

وعلى كل، إذا كانت سرعة الكرة بالنسبة للسفينة ٠,٦ من سرعة الضوء وسرعة السفينة بالنسبة للمحيط ٠,٣ من سرعة الضوء، فعندئذ يكون هناك اختلاف محسوس في السرعات المحسوبة عن طريق معادلتين مختلفتين. فمن تحولات جاليليو تكون سرعة الكرة بالنسبة للمحيط هي ٠,٦ + ٠,٣ = ٠,٩ من سرعة الضوء. وتكون سرعة الكرة من تحولات لورنتز بالنسبة للمحيط ٠,٧٦ من سرعة الضوء.

فإذا كانت مكونات السرعات هي ٠,٩ و٠,٦ من سرعة الضوء، فستعطي معادلة جاليليو 1.5c، بينما تعطى معادلة لورنتز 0.97c. وفي الواقع وكما يوضح جدول ٦-٢ من المستحيل إضافة السرعتين اللتين هما أقل قليلًا حتى من سرعة الضوء، بحيث نحصل على نتيجة تكون مساوية لسرعة الضوء. فإذا كانت واحدة من السرعات مساوية تمامًا لسرعة الضوء، إذن بإضافتها إلى السرعة الأخرى وفقًا لمعادلة السرعة المضافة للورنتز سنحصل على سرعة الضوء. ويعني هذا أن سرعة الضوء ثابتة بالنسبة لكل المشاهدين، كما هو مطلوب بواسطة مبادئ نسبية أينشتاين.

وهكذا يبدو أن سرعة الضوء حد طبيعي للسرعة لأنه من المستحيل وفقًا لمعادلة لورنتز للسرعة المضافة، أن تضيف كميات إضافية صغيرة من السرعة لجسم ليصل إلى ما فوق سرعة الضوء. وهذا يعني أن قوانين نيوتن للحركة كما تناقش عادة، وعلى الأخص القانون الثاني لنيوتن، غير صحيحة. وكما شرحنا في الفصل الثالث، إذا استخدمت قوة ثابتة لتؤثر على جسم، فسيكون تسارع الجسم ثابتًا، أي أنه برسم منحنى للسرعة مقابل الزمن يعطي خطًّا مستقيمًا يزيد باستمرار مع الزمن. إلا أن فرض حد أقصى للسرعة يعني أن السرعة لن تزداد إلى ما لانهاية. فقد تقترب السرعة كثيرًا جدًّا من سرعة الضوء لكنها لن تتخطاها، كما هو موضح في الشكل ٦-١٢. فكلما اقتربت السرعة من سرعة الضوء يصبح معدل الزيادة أقل، أي أن تسارعها يصبح أقل. ويسلك الجسم كما لو كان قصوره الذاتي يزداد لأن نفس القوة تعطي تسارعًا أقل. ولكن لأن الكتلة هي مقياس للقصور الذاتي، يمكن القول بأن كتلة أي جسم تصبح أكبر كلما زادت سرعته. وتصبح زيادة الكتلة محسوسة بدرجة أكبر كلما اقترب الجسم من سرعة الضوء.

والسرعة كمية نسبية، ومع كلٍّ، إذا كان الجسم مراقبًا من إطار مرجعي عند مستوى سرعة مساوٍ لمستوى سرعة الجسم فستكون سرعته إذن صفرًا، وفي الإطار المرجعي لا تتغير سرعته. وعليه فإن الكتلة هي أيضًا كمية نسبية.

وفي الواقع ليست قوانين الحركة لنيوتن غير قابلة للإصلاح ولا هي غير صحيحة تبعًا للنظرية النسبية لأينشتاين. وبالأحرى يجب أن تتغير تعريفات بعض الكميات التي تم حسابها في الميكانيكا. فمن الضروري أن تعاد صياغة القانون الثاني لنيوتن في صورته الأساسية، بجعل القوة تتناسب مع معدل زمن تغير كمية الحركة، ونعترف بصفة خاصة أنه عند حساب كمية الحركة على أنها حاصل ضرب الكتلة والسرعة، نعترف أن الكتلة ليست مستقلة عن السرعة، وبالمثل من الضروري إعادة النظر

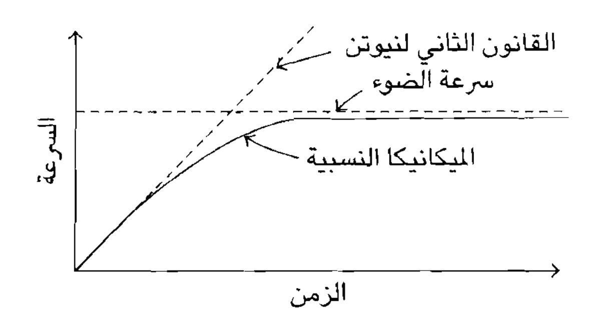
جدول ٦-٢: مقارنة نتائج السرعة المضافة وفقًا لتحولات جاليليو ولورنتز.

u (ميلًا/ساعة)	v (ميلًا/ساعة)	$u + v$ (ميلًا/ساعة)	$u + v/(1 + uv/c^2)$ (ميلًا/ساعة)
٦٠	٢٠	٩٠	٩٠
١٨٦	١٨,٦	٢٠٤,٦	٢٠٤,٥٩٩٩٨
١١١٦٠٠	٥٥٨٠٠	١٦٧٤٠٠	١٤١٩١٨
٩٣٠٠٠	٩٣٠٠٠	١٨٦٠٠٠	١٤٨٨٠٠
١٣٩٥٠٠	١٣٩٥٠٠	٢٧٩٠٠٠	١٧٨٥٦٠
١٦٧٤٠٠	١١١٦٠٠	٢٧٩٠٠٠	١٨١١٦٤
١٨٦٠٠٠	١٨٦٠٠	٢٠٤٦٠٠	١٨٦٠٠٠
١٨٦٠٠٠	١٨٦٠٠٠	٣٧٢٠٠٠	١٨٦٠٠٠

وأن نعدِّل تعريف طاقة الحركة لتتضمن حقيقة أن زيادة طاقة الحركة لا تأتي من زيادة السرعة فقط بل من زيادة الكتلة أيضًا. فالشغل المبذول لا يعطي الجسم طاقة حركة فقط ليزيد من سرعته بل يزيد أيضًا من كتلته. (المعادلة الجديدة ليست فقط $(1/2)mv^2$ وبها m أيضًا متزايدة، بل معقدة بعض التعقيد.) وبعبارة أخرى فإن الكتلة شكل من أشكال الطاقة، تمامًا مثل الحرارة التي هي شكل من أشكال الطاقة. وحيث أظهر بوانكاري وآخرون أن الطاقة الكهرومغناطيسية يمكن اعتبار أن لها كتلة، أكد أينشتاين بجرأة عن طريق معادلته $E = mc^2$ أن كل كتلة تكافئ طاقة. وأشار أيضًا أنه ليست الزيادة النسبية في كتلة جسم عندما تقترب سرعته من سرعة الضوء هي فقط التي تمثل زيادة في الطاقة، بل حتى كتلة أي جسم له سرعة مساوية للصفر، المسماة الكتلة الصحيحة أو الكتلة الساكنة، هي شكل من أشكال الطاقة.

ومن حيث المبدأ، ووفقًا للفصلين الرابع والخامس، يمكن تحويل أي شكل من أشكال الطاقة إلى شكل آخر. وهكذا فإن طاقة أي كتلة يمكن أن تتحول إلى طاقة ضوئية أو طاقة أشعة جاما أو العكس. ومثل هذه التحولات موجودة في الطاقة النووية وفي استحداث واستنفاذ الجسيمات الأولية للمادة، كما سيتم مناقشة ذلك في الفصل الثامن.

وواحدة من النقاط الهامة التي نحتاج للتأكيد عليها تتعلق باستخدام النظرية النسبية في النظريات الأخرى في الفيزياء. وتعتمد التأثيرات النسبية عادة على السرعات



شكل ٦-١٢: منحنى السرعة مقابل الزمن لقوة ثابتة. وفي الميكانيكا النسبية، لا يمكن أن تزيد السرعة إلى ما لانهاية، لكنها محدودة بسرعة الضوء.

العالية بشكل كبير حتى يمكن مشاهدتها. فمثلًا سرعة مقدارها ١٠٪ من سرعة الضوء ستنتج تأثيرًا نصف بالمائة. وتأثير سرعة مقدارها واحد بالمائة من سرعة الضوء سيكون أقل مائة مرة، ولا يمكن قياسه في معظم الأحوال. وسرعة كهذه تعتبر عالية جدًّا ١٨٦٠ ميلًا في الثانية بالمقارنة مع سرعة الصواريخ فوق الصوتية، والتي يمكن أن تكون ١٨٦٠ ميلًا في الساعة — أي أقل بمعدل ٣٦٠٠ مرة من تلك السرعة. ونتيجة لذلك، في أغلب الحالات، لا يمكن ملاحظة التأثيرات النسبية. وعلى الجانب الآخر، تلعب النسبية دورًا كبيرًا في الفيزياء الفلكية وفي الفيزياء الذرية والنووية.

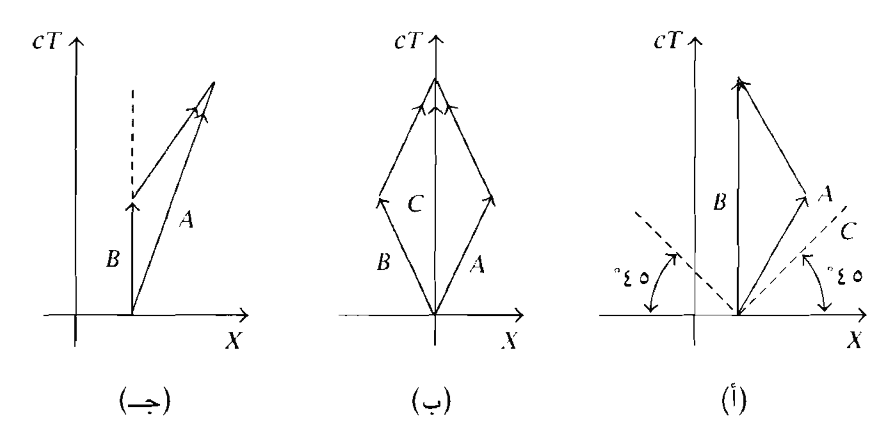
من المثير أن نتصور كيف تبدو لنا الأشياء إذا كانت سرعة الضوء أقل كثيرًا مما هي بالفعل، ولنقل ٢٠ ميلًا في الساعة. ستكون تداعيات ذلك مثيرة: مثلًا، الاستشهاد بحركة المرور في الحديث عن السرعة سيصبح في الغالب لا وجود له لأنه من المستحيل التحرك بسرعة أسرع من ٢٠ ميل في الساعة. وأصبح مثل هذا الموقف مجالًا لسلسلة من القصص القصيرة، التي كتب معظمها في ثلاثينيات وأربعينات القرن العشرين جامو* تصبح الدراجات قصيرة جدًّا وراكباتها أنحف أثناء قيادتها كما يراهم المارة، بينما تصبح مجموعات المباني المدينة قصيرة جدًّا بالنسبة لرؤية راكبي الدراجات.

*تشوه بعض مواضيع هذه القصص نظرية النسبية. وتظهر بصفة خاصة الأجسام المتحركة القريبة من سرعة الضوء على شكل دوران بدلًا من التقصير في اتجاه الحركة. إلا أن المغزى العام من القصص مفيد في تخيل تأثيرات النسبية، وكذلك تلك المستخلصة من نظرية الكم موضوع الفصل السابع.

وبعد مرور بعض الوقت من تقديم أينشتاين النظرية النسبية سُئل أن ينظر في السؤال التالي: افترض أن توءمين متماثلين ولدا، وفي سن معينة أرسل توءم (A) إلى الفضاء وبسرعة عالية جدًا حتى إن التأثير النسبي بات ملحوظًا. وحيث إن السن عملية تتوقف على الزمن، فالتوءم (B) الذي يظل على الأرض سريعًا ما يكون قادرًا أن يقول إن الزمن يمر أبطأ بالنسبة للتوءم (A) (استطالة الزمن) وعليه يصير التوءم (A) أصغر من التوءم (B). إلا أن التوءم (A)، مع علمه أن كل الحركة نسبية، يعتبر أن التوءم (B) هو الذي يتحرك. ولذلك فهو أصغر ومن الطبيعي، فإن الطريقة التي نحدد بها بالتأكيد أي التوءمين أصغر هي أن نحضرهما معًا ثانية ونقارن كلًّا منهما مع الآخر. تكمل سفينة الفضاء رحلتها وتعود إلى الأرض حتى يمكن إجراء المقارنة. وسئل أينشتاين أي التوءمين أصغر ولماذا. وبعد تفكير أجاب أينشتاين إن التوءم (A) الرحالة من المؤكد أنه أصغر. (ولقد أجريت بالفعل تجربة لاختبار ذلك. فقد أرسلت ساعات ذرية تم معايرتها بعناية في رحلات طويلة بالطائرة ثم أعيدت وقورنت بساعات مماثلة كانت موجودة بالمعمل. فوجد أن الساعات المسافرة قد رصدت فترات زمنية أقل [بسبب استطالة الزمن] من الساعات الثابتة.)

وأساس ما في موضوع التمييز بين التوءمين هو أن التوءم (A) كان عرضة للتسارع: (١) عندما أرسل إلى الفضاء، (٢) وعندما غير اتجاهه وعاد إلى الأرض. ففي النظرية النسبية العامة لأينشتاين (وسيتم مناقشتها فيما يلي بمدلولات كل الأطر المرجعية وليس أطر القصور الذاتي المرجعية فقط) يتضح أن التسارعات ينتج عنها بطء في الوقت. وبدون التطرق إلى تفصيلات أكثر، نستطيع أن نرى أن هناك اختلافًا في تاريخ التوءم (A) عند مقارنته بتاريخ التوءم (B). يمكن توضيح ذلك بطريقة رائعة بمساعدة شكل مينكوفسكي.

يمثل شكل مينكوفسكي ببساطة علاقة بين الزمن والمسافة كما يظهر في الشكل ٦-١٣(أ). لاحظ أنه في هذا الشكل، بخلاف الأشكال الموضحة سابقًا في الفصل الثالث، يمثل المحور X المحور الأفقي والمحور الرأسي هو محور cT بدلًا من محور T. (وتستخدم cT لتأكيد وحدة الزمكان ولإعطاء ما يسمى البعد الرابع نفس نوع وحدات القياس مثل الأبعاد الثلاثة الأخرى.) البيانات المرسومة على مثل هذا الشكل هي مواقع جسم والأوقات التي تواجد فيها في تلك المواقع. وعندما يكون الجسم في حالة سكون في إطار مرجعي، فإنه سيحافظ على نفس قيمة X بمرور الوقت، والشكل الناتج سيكون خطًّا مستقيمًا رأسيًّا، كما يشير بذلك الخط B في الشكل.



شكل ٦-١٣: أشكال مينكوفسكي. cT محور الزمن، X محور المكان (أ) A يترك الأرض ويعود فيما بعد (ب) كل من A وB يتركان الأرض ويعودان فيما بعد، (جـ) A يترك الأرض ويتبعه B بعد فترة، و«يلحق» بـ A.

والجسم المتحرك في اليمين يُمثل بالجزء الأسفل من الخط A في الشكل، وذلك المتحرك في اتجاه اليسار يُمثل بالجزء الأعلى من الخط A.

يسمى مثل هذا الشكل خط العالم، وفعليًّا فهو يدلنا على تاريخ الجسم لأنه يسجل أين كان الجسم ومتى كان في ذلك المكان. لاحظ أن الخط المتقطع C يمثل جسمًا يتحرك بسرعة الضوء، ويكون عند زاوية ٤٥ درجة. وهكذا بالنسبة لخط العالم فلن يكون له ميل أقل من ٤٥ درجة، لأن ذلك مستحيل وفقًا لمبادئ النسبية لأينشتاين.. فإذا كان B وA هما خطَّا عالمين لتوءمين متماثلين، إذن يبين الشكل ٦-١٣(أ) أن تاريخهما مختلف، وعليه نستطيع التنبؤ بأن أعمارهما ستكون مختلفة عندما يتواجدان معًا.

يصور الشكل ٦-١٣(ب) موقفًا مختلفًا بعض الاختلاف. فبدلًا من توءمين، يمثل هذا الشكل ثلاثة توائم A, B, C. وبينما يظل C على الأرض، يتحرك A إلى اليمين كما في الماضي وB يتحرك إلى اليسار بالنسبة للأرض. وعندما يعود كل من A, B إلى الأرض، سيكون عمرهما متماثل، لكن سيكون أقل من عمر C. ويمثل الشكل ٦-١٣(جـ) موقفًا آخر وهو يتعامل مع توائم فقط. في هذه الحالة بدلًا من عودة A إلى الأرض، يرسل B في سفينة فضاء ليلحق بـ A وفي هذه الحالة سيصير B أصغر من A عند التقائهما.

لقد أثرت النسبية ورحلات الفضاء بشكل كبير على الخيال الشعبي. وكثيرًا ما صورت الروايات والصور المتحركة والعروض التليفزيونية رحلات الفضاء بدءًا

بجول فيرن منذ أكثر من قرن مضى. وبالمثل ففكرة الزمن كبعد رابع، والسفر عبر الزمن ترجع إلى الماضي، على الأقل إلى أيام مارك توين، حتى قبل ظهور أينشتاين على مسرح الأحداث. ويثار سؤالان: هل من الممكن السفر إلى نجوم ومجرات بعيدة؟ هل يمكن لشخص ما السفر عبر الزمن؟

تقاس المسافات الفلكية بالسنوات الضوئية، أي المسافة التي يقطعها الضوء في عام واحد. ولكي تسافر إلى نجم يبعد بمقدار مائة سنة ضوئية، مطلوب رحلة تستغرق على الأقل مائة سنة ضوئية لسفينة تتحرك بالسرعة العظمى، سرعة الضوء. فإذا أرسل طاقم السفينة رسالة بالراديو بمجرد وصولهم، فقد يستغرق مائة سنة أخرى لمراقبي البعثة على الأرض لتلقي الرسالة، وهكذا فالطاقم على السفينة ومراقبي المهمة عليهم أن يعيشوا مدة طويلة جدًّا. وبما أن أقرب نجم يبعد ٤,٣ سنة ضوئية هو (ألفا سينتاورى «قنطورس») (Alpha Centauri) وعليه تكون أقل رحلة ذهاب وإياب هي ٨,٦ سنة ضوئية. وعلى كل، فمعظم النجوم تبعد أكثر من ١٠٠ سنة ضوئية. وعرض مجرتنا، درب اللبانة، هو حوالي ١٢٠٠٠٠ سنة ضوئية. والمسافة لأقرب مجرة أخرى (أندرو ميدا) هي ٢,٢ مليون سنة ضوئية ولذا فالسفر إلى المجرات الأخرى يبدوا شيئًا بعيد المنال، وعليه يبدو أن النظرية النسبية، من خلال فرض نهاية عظمى للسرعة، قد جعلت السفر الممتد في الفضاء أمرًا مستحيلًا.

إلا أن المشكلة تستحق نظرة ثانية. فإذا كان المسافرون في الفضاء يسافرون إلى النجم بسرعة تعادل ٩٩,٩ من سرعة الضوء، فإن ساعاتهم البيولوجية ستكون بطيئة، كما يراها من هم على الأرض. وسينقضي من عمرهم ٩,٩٤ سنة (استطالة الزمن)، أثناء رحلة الذهاب والعودة. ومن الطبيعي أن المسافرين في الفضاء سيرون من خلال إطارهم المرجعي أن الوقت بالنسبة لهم يمر بطريقة طبيعية، وسيلاحظون أن المسافة للنجم لم تكن ١٠٠ سنة ضوئية بل بالأحرى ٤,٤٧ سنة ضوئية فقط، وبناءً على سرعتهم فرحلة الذهاب والعودة تستغرق ٩,٩٤ سنة ضوئية فقط. وقد يجدون، من الطبيعي، أن الأشياء قد تغيرت كثيرًا عند رجوعهم إلى الأرض. فمثلًا سيجدون أن التقويم قد تقدم بمائتي سنة وقد لا يعثرون على الإطلاق على أي تسجيل لمغادرتهم الأرض أكثر من فقرة صغيرة في كتاب مدرسي.

وهكذا وبالرغم من أن السفر في الفضاء يمكن تصوره، فإن السفر عبر الزمن أمر آخر. لا جدال في أن الناس تسافر في الزمن إلى الأمام، لكن السفر إلى الخلف في الزمان أمر غير منطقي، وبصفة خاصة إذا كان المسافرون عبر الزمن قد يشتركون

في أحداث زمن مضى. وقد يحطم ذلك علاقات الغرض والأثر. فمثلًا قد يعني ذلك أن الأحفاد يعيشون قبل أن يكون أجدادهم قد تقابلوا بالمرة. وطبيعي، عندما تقع الأحداث في الفضاء العميق، ولنقل مثلًا في نجم على بعد مائة سنة ضوئية، فما يشاهد هو شيء ما حدث منذ مائة سنة مضت. فطاقم سفينة الفضاء المذكور أعلاه لا يستطيع أن يؤثر في أحداث المجرة التي تشاهد على الأرض لأنها قد تم حدوثها بالفعل. وعلاوة على ذلك، لن يستطيعوا التأثير على أحداث تحدث الآن أو بعد خمس سنوات من الآن، لأنه ومن مدلولات المشاهدة من الأرض سيقضون أكثر من مائة سنة ليصلوا إلى النجم.

وبالعودة ثانية إلى الرسم البياني لمينكوفسكي في شكل ٦-١٣(أ)، نرى أن تلك الأحداث الموجودة في الجزء العلوي من زاويتي ٤٥ في الرسم البياني تكون الخطوط المتقطعة فقط هي المتاحة للمسافرين بدءًا من حدث معين في الزمكان. وكل الأحداث الأخرى، وخاصة تلك في الاتجاه سالب cT الذي يتضمن العودة إلى الوراء في الزمن فهي ليست متاحة.

النظرية النسبية العامة

النظرية النسبية المذكورة سابقًا بخطوطها العريضة تعرف بالنظرية النسبية «الخاصة»، لأنها تستخدم فقط في حالة خاصة واحدة. وهي تعطي المعادلات التحويلية بين الأطر المرجعية غير المتسارعة (القصور الذاتي). وتبدو قوانين الفيزياء، بهذه المعادلات التحويلية، بنفس الشكل في كل أطر القصور الذاتي المرجعية، وترى على أنها تتمشى مع مبدأ نسبي كما توقعه في الأصل جاليليو ونيوتن وآخرون.

ولقد رأينا، باستخدام تلك المعادلات التحويلية الجديدة، أن بعض التداعيات غير المتوقعة المعينة تحدث عند مقارنة الأزمنة والأطوال والكتل في أطر قصور ذاتي مرجعية مختلفة. وتطبق تلك المعادلات التحويلية فقط بين أطر القصور الذاتي المرجعية، ومع ذلك، فقد اعتقد أينشتاين أن المرء يمكنه أن يستخدم أي إطار مرجعي، بما في ذلك الأطر المرجعية المتسارعة.

والنظرية التي تستطيع أن تخصص معادلات تحويلية تستخدم أطرًا مرجعية غير محددة بالحالة الخاصة للأطر المرجعية ذات القصور الذاتي فقط؛ يطلق عليها النظرية النسبية «العامة».

قضى أينشتاين حوالي عشر سنوات بعد نشره النظرية النسبية الخاصة يبحث بصفة أساسية في النظرية النسبية العامة. ونشر سنة ١٩١٦ وصفه الكامل لمثل هذه النظرية التي قوبلت برد فعل عارم في المجتمع العلمي. وبالرغم من القول بأنه كان هناك العديد من الفيزيائيين الآخرين الذين كانوا على وشك التوصل إلى النظرية النسبية الخاصة عندما نشر أينشتاين أبحاثه عنها سنة ١٩٠٥، فإنه من المقبول عمومًا أن أبحاث أينشتاين عن النظرية العامة كانت في مرحلة متقدمة كثيرًا عن أقرانه. وتقف النظرية النسبية العامة لأينشتاين كواحدة من أعظم إنجازات العقل البشري.

بدأ أينشتاين أبحاثه عن النظرية النسبية العامة بملاحظة بدأت أول الأمر شيئًا جانبيًّا. لاحظ أن نفس الكمية — الكتلة — موجودة في كل من القانون الثاني للحركة لنيوتن وفي القانون العام للجاذبية. ولقد استرعى انتباهه أنه إذا كان هذان القانونان مستقلين فعلًا، فيجب أن يُعرَّف نوعان مختلفان من الكتلة. فالقانون الثاني لنيوتن $(F = ma)$ يعرف كتلة قصور ذاتي، وقانون الجاذبية $(F = Gm_1m_2/r^2)$ يعرف الكتلة الجاذبية. وفي الواقع كانت بعض الأبحاث الدقيقة تجرى تقريبًا في ذلك الوقت لتوضيح ما إذا كان هناك اختلاف بين كتلتي القصور الذاتي والجاذبية لأي جسم. ولم يكن من الممكن قياس أي اختلاف بين الكتلتين، ويبدو أن هناك مصادفة عجيبة أنهما متساويتان: وتساءل أينشتاين عما إذا كانت مصادفة أن نفس الكمية متضمنة في كل من القانونين. وقرر أن التسارع (كما هو متضمن في القانون الأول لنيوتن) والجاذبية لا بد أنهما مترابطان. وواصل أبحاثه عندئذ بأن أظهر أنه من المستحيل، في الواقع، أن تحدد الفرق بين قوة الجاذبية وتسارع «مكافئ» — العلاقة التي أصبحت تعرف بفرض أينشتاين المكافئ.

وكمثال بسيط لتكافؤ الجاذبية والتسارع، نفترض وجود موقف لشخص يقف في سفينة فضاء في العالم الخارجي، بعيدًا تمامًا عن أي نجم أو كوكب، فإذا تحركت السفينة بسرعة ثابتة فإن الشخص سيكون وكأنه عديم الوزن، تمامًا كما حدث لرواد الفضاء في رحلتهم إلى القمر. وعندما تستقر السفينة على كوكب فسيشعر الشخص بقوة جاذبية، مانحة إياه أو إياها وزنًا. وتشير فرضية أينشتاين أنه يمكن الحصول على نفس التأثير ببساطة بتسارع سفينة الفضاء. ونحن جميعًا على إدراك تام بالفكرة الأساسية المتضمنة: فعندما تبدأ غرفة المصعد في الحركة إلى أعلى، نشعر بالتسارع وندفع إلى أسفل إلى أرض المصعد. (هذا هو القانون الثالث لنيوتن. تدفع

أرضية المصعد المسافر إلى أعلى ويدفع المسافر نفسه إلى أسفل المصعد.) وإذا أمكن لشخص ما أن يجعل تسارع سفينة فضاء موجودة في الفضاء مستمرًا ومساويًا تمامًا لتسارع جاذبية سطح الأرض، فإنها قد تستحدث قوة «إلى أسفل» تعمل وكأنها جاذبية. وإذا لم يكن بالسفينة نوافذ فسيكون من المستحيل للشخص بالداخل أن يعرف سواء عن طريق «الإحساس» أو حتى بالتجربة الدقيقة، ما إذا كانت القوة نتيجة التسارع أو قوة الجاذبية الصادرة من كتلة كبيرة.

وهكذا فلدينا موقف يمكن فيه لقوة أن تحاكى بواسطة تسارع، كما يوجد أمثلة كثيرة أخرى. وليس من الضروري أن يكون التسارع في خط مستقيم. فعندما تستدير سيارة متحركة بسرعة حول ناصية شارع، فسيشعر ركابها جميعًا وكأن قوة تدفعهم تجاه جانب السيارة. ويشار إلى هذه القوه على أنها قوة طرد مركزية — ليست قوة بالمرة لكنها فقط الشعور الذي نحس به ككتلة قصورنا الذاتي التي تحاول أن تظل في خط مستقيم، حركة منتظمة بينما تدور السيارة حول ناصية الشارع. وإذا لم يكن هناك قوة قامعة (ما يسمى قوة دافعة نحو المركز، نوقشت في الفصل الثالث) فسيتسارع الركاب مع السيارة. إلا أنهم، بالنسبة للأرض سيواصلون الحركة المنتظمة في خط مستقيم.

وقوة الطرد المركزية هي قوة زائفة من حيث إنها لم تأت بواسطة قوة خارجية مبذولة على جسم بل هي نتيجة تسارع سيارة وقصور ذاتي للجسم. وكثيرًا ما يطلق على مثل هذه القوى الزائفة قوى القصور الذاتي. ولاحظ أنه يمكن لقوة الطرد المركزية أن تُستخدم لمحاكاة الجاذبية. وإحدى الطرق لتقديم بيئة «تشبه الجاذبية» في الفراغ هي أن تجعل المحطة الفضائية على شكل حلقة لنتوء لولبي. ولقد تم مثلًا تصوير مثل هذه المحطة الفضائية في شريط سينمائي للخيال العلمي عنوانه ٢٠٠١. وتدفع قوة الطرد المركزية الناتجة من النتوء اللولبي كل شيء (وكل شخص) ناحية الطوق الخارجي للنتوء. وإذا دار النتوء بالمعدل الصحيح فقط فإنه قد يعطي قوة طرد مركزية مساوية لقوة الجاذبية عند سطح الأرض.

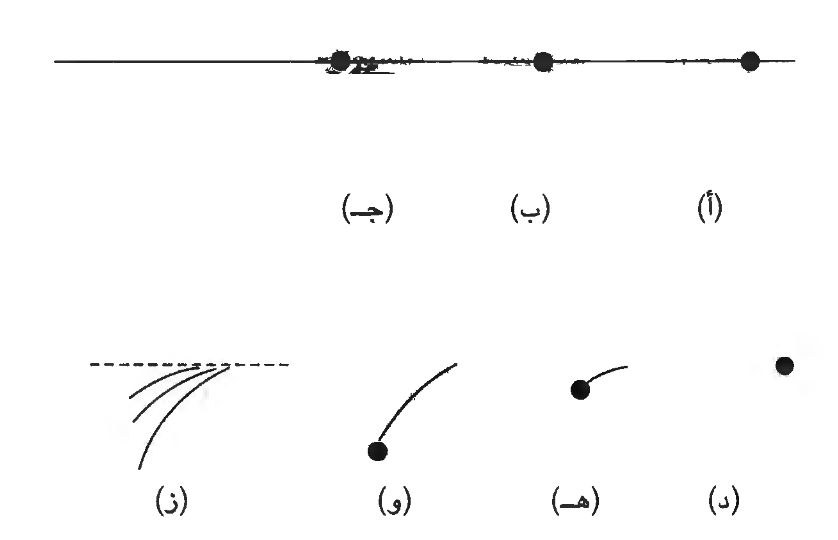
الأمر الهام فيما يتعلق بقوة الطرد المركزية بالنسبة لمناقشتنا الحالية هي أنها فعلًا قوة زائفة، والتي تظهر فقط عندما يحاول المرء استخدام إطار مرجعي متسارع. وفي حالة إطار قصور ذاتي (غير متسارع) مرجعي لا تظهر هذه القوة. ولأن الكتلة هي التي تحدد مقدار هذه القوة الزائفة (كتلة القصور الذاتي)، فقد تساءل أينشتاين هل من الممكن في الحقيقة أن ينظر إلى الجاذبية، التي هي أيضًا

نتيجة لكتلة (كتلة جاذبية)، على أنها قوة زائفة يعتمد اختيار الإطار المرجعي على وجودها. ويأتي هذا، في الأساس، من فرضيته للتكافؤ — أن القصور الذاتي والكتلة الجاذبية هما الشيء نفسه. وهكذا شعر أينشتاين أنه لم يكن مصادفة أن الكتلة هي الشيء المسئول الرئيسي عن القصور الذاتي والجاذبية، وأنهما لا بد أن يكونا مرتبطين.

من الممكن في الواقع، اختيار الإطار المرجعي المناسب، «التخلص من الجاذبية» حتى على سطح الأرض. افترض أن شخصًا ما يقف على قاعدة ميزان داخل مصعد يتحرك بسرعة ثابتة. سيشير مؤشر الميزان إلى وزن الشخص. فإذا انقطع الكابل الذي يمسك بالمصعد، يسقط المصعد متأثرًا بجاذبية التسارع. وبينما يسقط المصعد سيقرأ مؤشر الميزان صفرًا، أي أن الشخص لا وزن له. وفي إطار المصعد الساقط اختفت قوة الجاذبية. وبالمثل فرواد الفضاء يكونون عديمي الوزن وهم في مدار حول الأرض، لأن إطارهم المرجعي، الكبسولة الفضائية، تتسارع حول الأرض (وهي دائمًا في «سقوط» مستمر).

إن مبدأ التكافؤ يقوم بما هو أكثر من تأكيد هوية الجاذبية والقصور الذاتي. إنه ينص على أن أي تأثير يمكن أن يعزى إلى إطار مرجعي متسارع، يمكن وبنفس القدر أن يسمى تأثيرًا جاذبيًا. ويبين شكل ٦-١٤ سفينة فضاء متسارعة في العالم الخارجي. تلقى كرة عبر السفينة وتستغرق ثانيتين لتصل إلى الحائط الآخر. ويبين الشكل ٦-١٤(ب) موقع الكرة وسفينة الفضاء بعد مرور ثانية، والشكل ٦-١٤(جـ) بعد ثانيتين، كما تُرى من خارج سفينة الفضاء. تحركت الكرة في خط مستقيم. وتظهر الأشكال ٦-١٤(د)، (و)، (هـ) موقع الكرة كما تُرى من داخل سفينة الفضاء. لقد أخذت الكرة مسار قطع مكافئ عند رؤيتها من داخل سفينة الفضاء. يمكن للمشاهدين من داخل سفينة الفضاء أن يصفوا مسار الكرة على أنه ناتج من ربط الحركة الأفقية مع الحركة التساقطية الناتجة من الجاذبية كما فعل جاليليو عند تحليله لحركة القذيفة (الفصل الثالث وشكل ٣-٥).

إذا كانت سرعة الكرة الأفقية تزداد، فستظل تسير في خط مستقيم بالنسبة للرؤية من خارج سفينة الفضاء وبشكل قطع مكافئ للرؤية من داخل سفينة الفضاء، وبالرغم من أنها لن «تسقط» كما في السابق. وحتى لو تساوت سرعة الكرة بسرعة الضوء، كما ترى من داخل سفينة الفضاء، فإنها ستظل في التحرك في مسار قطع مكافئ ويبدو أنها تسقط قليلًا. والشكل ٦-١٤(ز) يبين تأثير تزايد سرعة الكرة الأفقية عند رؤيتها من داخل سفينة الفضاء.



شكل ٦-١٤: مسار صاروخ في سفينة فضاء متسارعة، (أ، ب، جـ) كما ترى من خارج سفينة الفضاء. (د، هـ و) عند رؤيته من داخل سفينة الفضاء (ز) رؤية المسار من الداخل لسرعات أفقية مختلفة.

ووفقًا لمبدأ التكافؤ، فكل التأثيرات المبينة في الشكل ٦-١٤ كما ترى من داخل سفينة الفضاء، يمكن أن تعزى إما إلى تسارع سفينة الفضاء أو إلى تأثير مجال الجاذبية. وإذا عبر شعاع ضوء خلال سفينة الفضاء فإنه قد يسلك نفس مسلك كرة تتحرك بسرعة الضوء. وهكذا ووفقًا لمبدأ التكافؤ، يمكن لشعاع الضوء أن «ينثني» عن طريق مجال الجاذبية.

وفسر أينشتاين انثناء شعاع الضوء على أنه يمثل تحدبًا للفضاء نفسه. وتمامًا كما في النسبية الخاصة، علل ذلك بأننا نعرف معلوماتنا عن الفضاء من خلال القياسات بالضوء فقط. يكشف مسار شعاع الضوء طبيعة الفضاء (في الواقع أي أشعة كهرومغناطيسية). فالنجار أو الميكانيكي يحدد ما إذا كان السطح منبسطا أو مقوسًا عن طريق قياسه بمسطرة مستقيمة أو مسطرة عادية. ولكن كيف للمرء أن يعرف إذا كانت المسطرة نفسها مستقيمة أم لا؟ «نظرة» واحدة على طول المسطرة — فإذا انحرفت عن خط الإبصار، فهي إذن ليست مستقيمة: ويحدد خط

الإبصار (مسار شعاع الضوء) ما إذا كانت المسطرة مستقيمة أم لا. فإذا كان مسار شعاع الضوء نفسه ليس «مستقيمًا» لكن «محدبًا» إذن الفضاء نفسه محدب.

وانتهى أينشتاين بأن الجاذبية لا بد أن تكون قوة زائفة نتيجة حركة متسارعة لإطار مرجعي. وفسر ذلك، بأن الحركة المتسارعة كانت حركة قصور ذاتي عبر فضاء «مقوس». وتنص نظريته للنسبية العامة على أن التركيزات الكبيرة للكتلة تجعل الفضاء القريب منها محدبًا. وحركة أي جسم في ذلك الفراغ المقوس تكون بالضرورة متسارعة وستشعر«بقوة»، والسبب ببساطة تقوس الفضاء.

ويبدو غريبًا أن الفضاء يمكن أن يكون مقوسًا. ومن الصعب حتى أن نتصور ماذا يعني ذلك. ربما من الأفضل البدء باعتبار فراغ مقوس لبعدين ثم العودة للفراغ (العادي) ذي الأبعاد الثلاثة. الفراغ ذو البعدين هو سطح. وقد يكون السطح منبسطًا، مثل سطح طاولة ملساء أو مقوسًا مثل سطح كرة. ويعبر عن السطح المنبسط ذي البعدين بالسطح الإقليدي (على اسم عالم الرياضيات الشهير إقليدس الذي طور العديد من الأفكار الهندسية). ويقال عن السطح المقوس اللاإقليدي لأن نظرية إقليدس لن تنطبق هنا. وكما أشار إقليدس فالخطوط المتوازية على سطح منبسط لا تلتقي أبدًا ومجموع الزوايا الثلاث في المثلث هي ١٨٠ درجة. أما على السطح اللاإقليدي فهذه المقولات ليست صحيحة. وعلى سبيل المثال فمجموع زوايا مثلث مرسوم على سطح كرة تكون أكبر من ١٨٠ درجة. تخيل مثلث رسم على سطح الأرض بقاعدته على خط الاستواء وضلعيه يتجهان شمالًا ليلتقيا عند القطب الشمالي. الزوايا بين خط الاستواء والضلعين تكون كل منهما ٩٠ درجة. وعليه فهاتين الزاويتين مجموعهما وحدهما ١٨٠ درجة. والزاوية عند القطب الشمالي يمكن أن تكون أي شيء من صفر إلى ١٨٠، وعليه يمكن أن يكون مجموع الزوايا من ١٨٠ إلى ٣٦٠ درجة.

وعلى العموم، فعلى السطح المقوس حيث مجموع الزوايا الثلاث في مثلث تكون أكبر من ١٨٠ درجة يقال إن له تقوسًا موجبًا. والأسطح المقوسة التي بها مجموع زوايا المثلث الثلاث أقل من ١٨٠ درجة يقال إن له تقوسًا سالبًا. (وكمثال للتقوس السالب سرج الركوب على الحصان.)

ولنفهم كيف نعرف إذا كان فضاؤنا ثلاثي الأبعاد ومقوسًا أم لا، دعنا نسأل أولًا كيف لشخص محصور في فضاء ذي بعدين أن يعرف إذا كان مقوسًا أم لا. إننا لا نريد اختبار ذلك بتسلق برج أو بالنظر في اتجاه الأفق أو بالسفر إلى أعلى

في سفينة فضاء والنظر إلى أسفل. كل هذه الطرق تتضمن التحرك في البعد الثالث والنظر إلى أسفل إلى السطح ذي البعدين، ولذلك فإننا لا نستطيع أن نقوم بالمكافئ عند النظر إلى الفضاء ذي الأبعاد الثلاثة. ويجب أن نقيد أنفسنا إلى السطح ذي البعدين ونحاول أن نحدد ما إذا كان منبسطًا أم مقوسًا.

وكما تمت الإشارة من قبل، فمن الممكن تحديد ما إذا كان السطح ذو البعدين مقوسًا عن طريق علم الهندسة. نستطيع، ونحن ما زلنا مقيدين بالسطح، أن ندرس الخطوط المتوازية والمثلثات وأشكال التركيبات الأخرى من (ما نعتقد أن يكون) خطوط مستقيمة. فإذا تلاقت الخطوط المتوازية أو تقاطعت، أو إذا كان مجموع زوايا المثلث أكبر من ١٨٠ درجة فإننا نعرف أننا على سطح مقوس. وبالمثل، لدراسة فراغ ذي ثلاثة أبعاد يجب أن ندرس الخطوط المستقيمة وهندستها.

إنها «الخطوط المستقيمة» هي التي يجب في الواقع أن ندرسها. وكما يعرف أي طالب في بداية دراسته لعلم الهندسة هو أن الخط المستقيم هو أقصر المسافات بين نقطتين. إلا أن ذلك أمر حقيقي على سطح «منبسط» فقط أو على فضاء ذي ثلاثة أبعاد دون تقوس. أما على الجسم الكروي، فأقصر مسافة بين نقطتين هي «دائرة كبيرة» (خط مكون من تقاطع الجسم الكروي بمستوى يمر خلال نقطتين ومركز الجسم الكروي). وعامة، يطلق على أقصر المسافات بين نقطتين في فضاء معين الخط الجيوديسي. ويعتبر عمومًا أن الضوء يتحرك في أقصر المسارات احتمالًا بين نقطتين، أي أن شعاع الضوء سيعرف الخط الجيوديسي. وهكذا فإحدى الوسائل لتحديد إذا كان الفراغ ذو الثلاثة أبعاد مقوسًا أم لا هي باختبار إذا ما كان الضوء يسير في خطوط مستقيمة أم لا.

وربما تكون أكثر التجارب إقناعًا لتقوس الفضاء هي حيود أشعة الضوء المارة بجوار الشمس، وتنبأ أينشتاين أنه يتطلب أن تكون الكتلة المسببة لتقوس الفضاء من الكبر حتى ينتج عنها تقوسًا ملحوظًا. وعليه فإن أكبر تقوس للفضاء قريب من الأرض من المتوقع أن يكون بالقرب من الشمس. فإذا قبلنا أن أشعة الضوء تعرف الخط الجيوديسي في الفضاء، عندئذ نستطيع أن نختبر تنبؤ أينشتاين إذا استطعنا أن نشاهد بعناية أشعة الضوء المارة بجوار الشمس — من نجم بعيد مثلًا. والطريقة الوحيدة لفعل ذلك تكون خلال كسوف تام للشمس عندما يمر القمر بين الأرض والشمس ويحجب لحظيًّا ضوء الشمس.

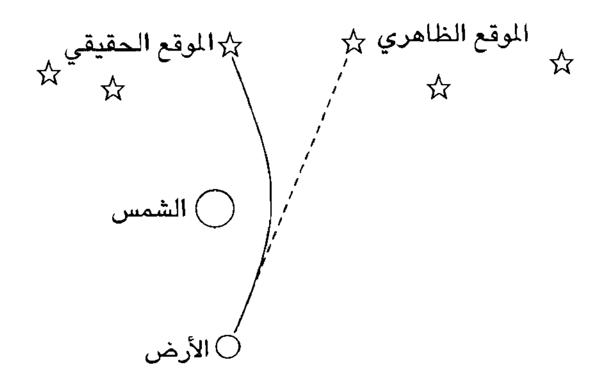
إذا استطعنا مشاهدة أشعة الضوء من نجوم مختلفة وأن نقارنها أثناء الكسوف، يمكن للمرء أن يختبر ما إذا كانت أشعة الضوء المارة بالقرب من الشمس قد حادت

(موقف مبين بالشكل ٦-١٥). وإذا تسببت الشمس فعلًا في تقوس الفضاء، فسيحيد إذن ضوء النجم المار بالقرب من الشمس، وسينحرف الموقع الظاهري للنجم عن موقعه الحقيقي، حيث يمكن تحديد ذلك بالنظر للخلف إلى الأرض. ويمكن التعرف على هذا الانحراف عن طريق مقارنة دقيقة لصورة مأخوذة لنجوم شوهدت أثناء الكسوف بصورة أخرى مأخوذة في يوم آخر لنفس مجال النجم عند رؤيته في الليل (وحيث إن الشمس لا تكون قريبة من خط النظر).

ولقد تم التأكد من التنبؤ بحيود أشعة الضوء بالقرب من الشمس عن طريق تجربة مشهورة قام بها فريق يقوده عالم فيزيائي إنجليزي يدعى آرثر إيدينجتون أثناء الكسوف الكلي للشمس سنة ١٩١٩. سافر إيدينجتون إلى جزيرة على الساحل الغربي لأفريقيا حيث استمر الكسوف مدة كافية ليحصل على صور جيدة لمجال نجم قريب من الشمس. وعند دراسة الضوء لمجال نفس النجم بعد عدة شهور، اكتشف أن النجوم المشاهدة القريبة من الشمس كأنها تحركت بالمقارنة بنجوم ليست بمثل ذلك القرب من الشمس أثناء الكسوف — وتقريبًا بنفس مقدار تنبؤ أينشتاين. كانت تلك التجربة مقنعة بما فيه الكفاية.

وحيث إنه من المعتقد أن الضوء لا كتلة له، فالضوء يجب ألا يتأثر بالمرة بكتلة الشمس وذلك عن طريق القانون العالمي للجاذبية لنيوتن. إلا أن أينشتاين تنبأ، على النقيض، أن الكتلة تقوس الفضاء نفسه وأن أشعة الضوء المتحركة على الخط الجيوديسي عبر الفضاء تنحرف بواسطة كتلة كبيرة. حصد التحقق التجريبي لتنبؤ أينشتاين عن طريق تجربة إيدنيجتون اهتمامًا هائلًا في الأوساط الإعلامية في ذلك الوقت، وأسهم بشكل كبير في رفعة مكانة أينشتاين على أنه نيوتن الجديد في العلوم.

هناك أدلة تجريبية أخرى لإثبات النسبية العامة، بجانب حيود ضوء النجم بواسطة الشمس. ناقشنا في الفصل الثالث (ميكانيكا نيوتن) حقيقة أن التداخل المتبادل لكل الكواكب الأخرى مع كوكب عطارد يتسبب في دوران المدار البيضاوي لعطارد ببطء، أو تغيره حول الشمس. ولقد تحدد هذا التغير البطيء لمدار عطارد لفترة من الزمن وهو حوالي ٥٧٤ ثانية على القوس. وبحلول سنة ١٩٠٠ حسب تأثير الجاذبية للكواكب الأخرى بعناية ووجد أنها مسئولة عن حوالي ٥٣١ ثانية على القوس لكل قرن. ولم يفهم سبب هذا التباين ومقداره حوالي ٤٣ ثانية على القوس حتى ظهرت النظرية النسبية العامة لأينشتاين. لأن مدار عطارد قريب جدًّا من الشمس، فالكوكب في الواقع يتحرك في جزء من الفضاء بتقوس صغير، لكنه



شكل ٦-١٥: الحيود الجاذبي لضوء نجم بواسطة الشمس.

هام. ويمكن إظهار تأثير هذا الفضاء المتقوس على أنه يعادل كل الـ ٤٣ ثانية على القوس المتبقية الضرورية. ويذكر هذا التباين في مدار الكوكب عطارد على أنه واحدة من المشكلات «غير الهامة» في فيزياء القرن التاسع عشر. اعتقد أغلب الفيزيائيين أنه يمكن حل المشكلة ببعض التصحيحات المبسطة غير الهامة لتحليل الحركة. ولكننا نرى بدلًا من ذلك أن رؤية ثورية جديدة لطبيعة الفضاء مطلوبة لحل المشكلة.

هنا يوجد أيضًا تحققات تجريبية أخرى للنسبية العامة، إلى حد ما أكثر تعقيدًا. تتضمن تلك التحققات إبطاء ساعات الأطر المرجعية المتسارعة أو مجالات جاذبية كبيرة و«الإزاحة الحمراء» للضوء الساقط في مجال الجاذبية. ليس من الضرورة أن نأخذ في الاعتبار تلك الاختبارات الأخرى، إلا الإشارة فقط بأن المبادئ الأساسية للنسبية العامة أصبحت الآن راسخة تمامًا. وفي نفس الوقت يجب الإشارة إلى أنه توجد عدة أشكال رياضية مختلفة للنظرية النسبية العامة بما في ذلك الشكل الأصلي المقترح بواسطة أينشتاين. ولا تختلف تلك النظريات عن نسخة أينشتاين فيما يتعلق بهذا الكتاب.

ويؤدي قبول الحاجة إلى النظرية النسبية العامة وتنبؤها بالفضاء المقوس إلى بعض التداعيات المعينة المتعلقة بطبيعة عالمنا الفيزيائي. وتضمن هذه التداعيات التقوس الشامل للفضاء واحتمال وجود ما يسمى الثقوب السوداء، فإذا كان تركيز كتلة كبيرة يسبب تقوس الفضاء القريب، إذن هناك احتمال أنه إذا كانت هناك كتلة كبيرة بما فيه الكفاية فإنها قد تسبب تقوسًا للفضاء كبيرًا إلى درجة أنه يمكن أن ينطوي ثانية على نفسه. وقد يحدث ذلك إما للعالم ككل أو في منطقة معينة بالقرب من كتلة كبيرة مركزة. فإذا وجدت كتلة كبيرة كافية في الكون، وإذا كان الكون

ليس كبيرًا جدًّا فسيؤدي ذلك بالتبعية إلى انطواء الفضاء حول الكون مرة ثانية على نفسه. وفي مثل هذا الوضع، فإن أي شعاع ضوء موجه في أي اتجاه لن يواصل السير إلى الخارج في خط مستقيم إلى ما لانهاية بل في النهاية «يسقط» ثانية في كتلة العالم. وقد تحدد كثافة كتلة الكون الحجم الفعلي للفضاء المصاحب للكون. وإذا لم تكن الكثافة الكلية لكتلة الكون كبيرة بما فيه الكفاية، فلن يكون تقوس الفضاء كافيًا ليسبب طي الفضاء على نفسه في النهاية. ومثل هذا الوضع قد ينتج عالمًا غير محدود — أي عالمًا بلا حدود فضائية.

يدور الآن جدال عما إذا كان الكون الفيزيائي الفعلي مغلقًا (ينطوي ثانية على نفسه) أم مفتوحًا (لن ينطوي أبدًا ثانية على نفسه). وبالرغم من أن النسبية العامة تتنبأ بأن الفضاء لا بد أنه مقوس (لأن الكتلة موجودة)، إلا أنه لا نستطيع قول إن الكون مفتوح أو مغلق. ويعتمد الجواب على الكتلة الكلية وحجم الكون، ويجد الفيزيائيون الفلكيون صعوبة في التوصل إلى تقدير دقيق للكتلة الكلية أو حجم الكون.

من المعروف أن حجم الكون يتمدد. يفترض أن ذاك عائد إلى الانفجار العظيم، المعروف بالانفجار الرهيب، الذي بدأ به العالم كما نعرفه. يستطيع الفلكيون ملاحظة أن الضوء الذي يستقبلونه على الأرض من مجرات بعيدة يزاح دائمًا في اللون باتجاه الجزء الأحمر من طيف الضوء، مشيرًا إلى اتجاه السرعات العالية بعيدًا عن الأرض.* ويعتقد أن أبعد المجرات المعروفة على بعد ١٥ بليون سنة ضوئية وتبتعد بشكل مهول. والسؤال هل سيواصل الكون التمدد إلى الأبد أو في النهاية سينكمش على نفسه، ويتوقف ذلك على ما إذا كان الكون مفتوحًا أم مغلقًا. فإذا كانت كثافة الكتلة كبيرة بما فيه الكفاية، وفضاء الكون مغلقًا وتمدد الكون في النهاية سيتوقف ويسقط الكون على نفسه. أما إذا كانت الكثافة ليست كبيرة بما فيه الكفاية، فسيظل الكون مفتوحًا والتمدد متواصلًا إلى الأبد. وليس هناك في الوقت الحالي دليل للتوصل إلى قرار حاسم عما إذا كان الكون مفتوحًا أم مغلقًا.

تشير النظرية العامة، على المستوى المحدود، إلى أنه إذا كان هناك كتلة مركزة تركيزًا كافيًا يمكن لها أن تقوس الفضاء مرة ثانية لينطوي على نفسه في الوسط

*يعرف ذلك بتأثير دوبلر وهي ظاهرة معروفة جيدا ترتبط بظواهر الموجات متضمنة الحركة النسبية للمصدر والمستقبل. وإزاحة دوبلر الحمراء تختلف عن الإزاحة الحمراء للجاذبية التي تنبأت بها النظرية النسبية العامة.

المحيط المباشر. وأصبح مثل هذا الموقف معروفًا عامة على أنه الثقب الأسود. وتكون كثافة الكتلة المطلوبة لذلك هائلة. إنها أكبر من كثافة النجم العادي أو حتى من كثافة النجم النيوتروني. ويتوقع تكون الثقوب السوداء عندما يستهلك نجم ضخمُ الكتلةِ أخيرًا وقودَه وينهار (أكبر عدة مرات من كتلة الشمس). وعندما ينهار النجم ويصل إلى حجم (أي قطره) حوالي ١٨ ميل فقط، يتقوس الفضاء وينطوي حول نفسه بما فيه الكفاية ليصبح ثقبًا أسود. وحيث إنه لا يستطيع أي شيء أن يهرب من مثل هذا الجسم الفضائي المطوي بما في ذلك أشعة الضوء التي ستتبع الفضاء المقوس، يسمى ذلك الجسم بالثقب الأسود. وأيضًا حيث إنه لا شيء يستطيع الهرب من الثقب الأسود، فمثل هذا الجسم لا يمكن رؤيته لكن يمكن التعرف عليه عن طريق تأثيراته على الأجسام الأخرى القريبة. كثير من هذه الثقوب السوداء معروفة للفلكيين، وتوجد كشركاء مع النجوم المرئية العادية (نظم ثنائية). ويمكن مشاهدة النجوم العادية تدور حول رفقاء غير مرئيين وتبعث بإشعاع (له خواص معينة) مشيرًا إلى أن كتلة ما تُسحب من النجوم العادية إلى الثقب الأسود. وفعليًا، قد يسمح استخدام أفكار النظرية الكمية للثقب الأسود أن يبعث ببطء طاقة على شكل أشعة كهرومغناطيسية (راجع مقال هـوكينج في مراجع هذا الفصل).

تشير النسبية العامة إلى أن خواص المكان (والزمكان) تعتمد على قوى الجاذبية وعلى المادة الموجودة. وتحدد خواص الزمكان بواسطة أشعة الضوء، التي قد رأينا أنها تعتمد على المجالات الكهرومغناطيسية. وقد شعر أينشتاين بأن هذه المجالات الكهرومغناطيسية يجب أن تحور تقوس الفضاء، وحاول أن يُضمِّن قوى كهرومغناطيسية في النسبية العامة للحصول على ما أصبح يعرف بنظرية المجال-الموحد. وبالرغم من التقدم الكبير الذي توصل إليه أينشتاين وآخرون في هذا الاتجاه، فإن الفهم النهائي للقوى الأساسية في الطبيعة يتطلب الأفكار الأساسية لميكانيكا الكم. وسنعرض تلك الأفكار في الفصلين القادمين ونعود إلى موضوع نظريات المجال الموحد فيما بعد.

تأثير النظرية النسبية على الفلسفة والأدب والفن

وكما ألمحنا في بداية هذا الفصل فقد تركت النظرية النسبية على الفلسفة والأدب والفنون المرئية تأثيرًا هامًّا. وقد استخدمت في بعض الأوجه لتحقق أو تدعم أفكارًا كانت متطورة على أي حال، وفي نواح أخرى ألهمت بطرق أخرى الفكر، بالرغم

من أن ذلك لم يكن على الدوام بالفهم الصحيح للنظرية. وقد انتقلت فكرة الإطار المرجعي في الفيزياء إلى الفلسفة والأخلاقيات كتعريف لوجهات النظر الأساسية والتطلعات. وهكذا اقترح المفهوم الفيزيائي حول عدم وجود إطار مرجعي مطلق، النسبية الأخلاقية لبعض الأفراد، دون الأخذ في الاعتبار فكرة الكميات الثابتة، التي هي في الواقع مكون أساسي في النظرية النسبية.

وفي نفس الوقت الذي كانت تتطور فيه النظرية النسبية، كانت تتطور أيضًا أنماط لتعبيرات جديدة في الفنون والآداب. كان بعض الرسامين التكعيبيين على دراية بشكل ما بالنظرية النسبية وضمنوها وفسروا بعض أفكارها في أعمالهم. واحتفل شعراء من أمثال وليم كارلوس وليامز وأرشيبالد ماكليش بالنسبية وأينشتاين وألفوا اللاماريكيه حول عائلة شتاين (جيرترود، وإيب-، وآين-) ورحلات الزمن النسبية. واستخدم فلاديمير نابوكوف ووليم فولكنر المفاهيم النسبية مجازيًّا. ونوقش دور أينشتاين كمصدر إلهام للفنون والآداب في كتاب حديث لفريدمان ودونلي، موجود بقائمة مراجع هذا الفصل.

الفصل السابع

النظرية الكمية ونهاية السببية

- لا نستطيع التنبؤ أو معرفة كل شيء



ماكس بلانك
(مكتبة المعهد الأمريكي لفيزياء نيلز بور مجموعة دبليو إف ميجرز).

نناقش في هذا الفصل نظرية فيزيائية أكثر ثورية وشمولية في تضميناتها في عدة أوجه عن نظريتي النسبية لأينشتاين. بداية، سنشير إلى بعض عيوب نظريات قد نوقشت من قبل (ميكانيكا نيوتن، والكهرومغناطيسية لماكسويل والديناميكا

الحرارية) ثم بعد ذلك سنناقش نظرية الكم. من العدالة أن نسأل لماذا يجب أن نفحص نظريات قديمة إذا كنا سنهملها حالًا. إلا أنه وحتى لو نحينا جانبًا حقيقة أن المرء يستطيع تقدير مفهوم جديد بشكل أفضل عندما يعرف قدر أفضليته عن المفهوم الذي يحل محله، فإن النظريات القديمة لها درجة معينة من الشرعية، وكثيرًا ما تكون مفيدة جدًّا، وكثير من الاستخدامات مبني عليها. والنظريات الجديدة أكثر تعقيدًا عند استخدامها الاستخدام الكامل، ومن الأسهل أحيانًا استخدام النظريات القديمة، مقرين بنقاط قصورها.

وأكثر من ذلك، لقد أصبحنا مثقفين بما فيه الكفاية لنقر أنه ربما وفي وقت ما بالمستقبل حتى النظريات والمفاهيم الأحدث قد يظهر بها عيوب. ومن المفيد إذن أن نعرف شيئًا ما عن العلماء والفلاسفة الميتافيزيقيين المتفانين وما قاموا به عبر القرن الماضي أو حول ذلك ليصلوا إلى فهم أفضل لكيفية الحصول على المعرفة الفيزيائية وكيفية تحقق النظريات.

من المتوقع عادة أن تكون النظريات العلمية منطقية ومعقولة. بجانب التعقيدات الرياضية المتضمنة في النظريات العلمية، فمن المتوقع أيضًا أن تكون معقولة ولا تنتهك «الفطرة السليمة». ومن الطبيعي أن الفطرة السليمة هي مفهوم ذاتي ويعتمد كثيرًا على مدى خبرة الفرد أو مجموعة من الأفراد. وبالرغم من ذلك، فالنظرية الجديدة يجب ألا تناقض النظريات أو الأفكار الكبرى والمقبولة والمبرهنة من قبل، إلا إذا استطاعت أن تظهر تلك النظريات الجديدة أن الأفكار المقبولة بها عيوب وأن النظرية الجديدة ليس بها تلك العيوب.

وعند تقييم نظرية ما، يفضل المرء أن يتناول حالات بسيطة جدًّا ويحاول برهنة أن تنبؤات النظرية بها معقولة وغير مثيرة للتناقض. فإذا كان لنظرية ما شرعية بالنسبة لحالة معقدة، فمن المؤكد أنها صحيحة بالنسبة للحالة البسيطة. وبالمثل، فإن مدى أهمية أي نظرية يجب أن تفحص، ويجب أن تناسب الحالات الصعبة. وبالفعل، فإن اختبارات استخدام النظريات للحالات الصعبة هي التي كثيرًا ما تقرر حدود صحة هذه النظريات والإقرار بالحاجة إلى النظريات الجديدة. وفي بعض الأحيان من الممكن إدخال تحويرات على نظريات موجودة ومن ثم التعامل مع الحالات الصعبة.

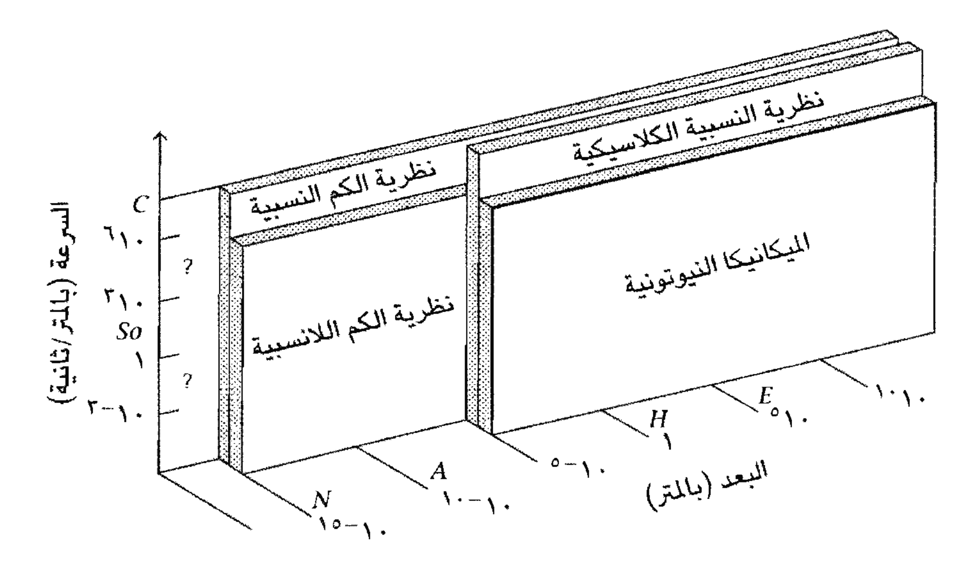
ويبدو أن نظرية الكم، موضوع هذا الفصل، تنتهك الفطرة السليمة. لكن نظرية الكم قد طورت للتعامل مع الأشياء الصغيرة جدًّا (حجم الذرات أو الجزيئات أو

حتى أصغر من ذلك) وهي الأشياء التي لم تستعملها الخبرة السابقة. وعليه فليس من المستغرب أن نظرية نيوتن قد فشلت بالنسبة لمثل هذه الأشياء. فلقد تطورت نظرية نيوتن لتتناول حركة الأجسام الكبيرة جدًّا، ولنقل: ذرات الغبار، والرصاصات وقنابل المدافع والكواكب وكل ما تراه العين المجردة أو بالميكروسكوب العادي. ولم يكن هناك أي دليل على أن منطقة نفوذ أهليتها تمتد إلى الأشياء الصغيرة جدًّا. وأمر حقيقي أيضًا أن نظرية نيوتن لا تصلح جيدًا عند درجات حرارة منخفضة (بالقرب من الصفر المطلق) لأنه حينها تصبح الحركة على مقياس صغير ذات أهمية.

من المألوف عند الكلام عن نظريات مشتقة من ميكانيكا نيوتن أو الكهرومغناطيسية لماكسويل وصفها بأنها الفيزياء «الكلاسيكية» بينما النظرية النسبية لأينشتاين ونظرية الكم بأنها الفيزياء «الحديثة». (وقد مضى حوالي تسعين عامًا منذ بدء الفيزياء الحديثة ولكن ما زال يشار إليها على أنها حديثة.) وكما أشرنا آنفًا فقد فشلت الفيزياء الكلاسيكية عند استخدامها لوصف ظواهر أجريت تحت ظروف غير عادية — سرعات عالية جدًّا و/أو أبعاد صغيرة جدًّا (ذرات) أو درجات حرارة منخفضة أو مرتفعة جدًّا.

يظهر الشكل ٧-١ مناطق نفوذ واستعمال الفيزياء الكلاسيكية ومناطق نظريتين عظيمتين للفيزياء الحديثة، الميكانيكا النسبية والميكانيكا الكمية. والمقياس الأفقي لهذا الشكل مشوه بطريقة تعطى تأكيدًا أكثر للظواهر ذات المقياس الأصغر. وتشير الحروف N, A, H, E على المقياس، إلى حجم النواة في الذرة، وإلى الذرة، والكائنات البشرية ثم إلى الأرض على الترتيب. وتم تشويه المقياس الرأسي للمبالغة في ظاهرة السرعة المنخفضة. ويجب أن نتصور الشكل كنظرة عامة للمناطق الأربع، كل منطقة منها أصغر من المنطقة التي تعتمد عليها.

وتعتبر نظرية الكم النسبية، التي تتضمن المادة في الفصول ٦ و٧ و٨؛ أكثر النظريات العامة المتاحة حاليًّا. وهي تغطي كل مجالات الشكل تقريبًا، وهي مناسبة لكل الأبعاد وكل السرعات المتاحة للتجربة حاليًّا. وغير معروف في الواقع ما إذا كانت قابلة للاستخدام كلية في حالة الأبعاد الأصغر كثيرًا من نواة الذرة، ومن المحتمل أنها ربما تفشل في مثل هذه الأبعاد ويجب إحلالها بنظرية أكثر عمومية. ونظرية الكم النسبية صعبة الاستخدام، ولذلك ولأغراض كثيرة يكون صحيحًا بما فيه الكفاية أن تستخدم نظرية كم لانسبية، آخذين في الاعتبار حدود استخدامها. وتغطي نظرية الكم اللانسبية جزءًا ضخمًا مشمولًا في نظرية الكم النسبية، وخاصة عند سرعات



شكل ٧-١: مناطق النفوذ النسبية للنظريات الفيزيائية. N القطر النموذجي للنواة. A القطر النموذجي للذرة. H حجم الإنسان. E قطر الأرض. So سرعة الصوت. c سرعة الضوء.

أقل من حوالي ١٠٠٠٠ أو ١٠٠٠٠٠ متر/ثانية. وتغطي النظرية النسبية الكلاسيكية الجزء الأيمن من الشكل ٧-١، أي الأجسام الأكبر من الجزيئات عند كل السرعات الفيزيائية الكلاسيكية والمشار إليها في الشكل بميكانيكا نيوتن، عندما تكون مريحة وأسهل في استخدامها وفهمها عن كل من النسبية وفيزياء الكم. وهكذا فهي تستخدم داخل منطقة نفوذ استخدامها (أي أجسام أكبر من الجزيئات وأبطأ من نسبة مئوية من سرعة الضوء)، حتى بالرغم من أننا نعلم أنها ليست صحيحة تمامًا. ويبين الجدول ٦-٢ بعض الأمثلة التي تتناول كيف كانت الفيزياء الكلاسيكية على خطأ، وهناك أمثلة أخرى نوقشت في ذلك الفصل. وفي الواقع شكل ٧-١ مضلل في أن مناطق النفوذ ليست بهذه الصرامة والتوحيد كما هو مبين. هناك «ثقوب» في الشكل العام. ويمثل الشكل ٧-٧ مثل هذا «الثقب».

يعكس الشكل ٧-١ فكرة أن كل النظريات الفيزيائية ما هي إلا تقريبات لفهم الفيزياء. ففي المناطق التي يدعي فيها كل من النظريات الحديثة والقديمة صلاحيته، يمكن للنظريات الحديثة أن تدعي دقة أكثر (والدرجة التي بها الدقة أكثر يمكن أن تكون أكثر بكمية ضئيلة جدًّا، وحتى غير قابلة للقياس). وهكذا فنحن نواصل استخدام الفيزياء الكلاسيكية (النيوتونية) في تصميم الجسور والسيارات لأنها أكثر راحة في الاستخدام ودقيقة بما فيه الكفاية، لكن عند دراسة النواة أو

الذرة أو الخواص الإلكترونية للجوامد يجب استخدام نظرية الكم، لأن النظرية الكلاسيكية تعطي الجواب الخطأ في هذه الحالات. ويمكننا استخدام نظرية الكم لتصميم جسر أو سيارة، لكن الإجابة ستكون في الأساس هي نفسها لو استخدمنا النظرية الكلاسيكية.

وبحلول نهاية القرن التاسع عشر كان هناك إجماع فكري عام على أن المعرفة العلمية الأساسية كانت تامة بشكل معقول. واعتقد كثير من الأفراد أن النظريات العظمى للفيزياء الكلاسيكية تم إرساؤها بحزم وأن كل ما هو غير معلوم في الكون يمكن تفسيره في النهاية على أساس تلك النظريات. إلا أنه كان هناك اعتراف بأن بعض المشاكل المتبقية يجب حلها.

ظهرت بعض هذه المشاكل عند محاولة استخدام النظرية الكهرومغناطيسية للضوء مع نظريات المادة والطاقة والديناميكا الحرارية لدراسة تداخل الإشعاع الكهرومغناطيسي مع المادة. كانت محاولة دمج نظريات القرن التاسع عشر العظمى تلك في مسلك متناسق لفهم تلك المشكلات المتبقية، كانت هي التي أدت في النهاية إلى التطورات الثورية في الفيزياء الكمية. وربما يكون من الغرائب أن واحدة من أعظم الإنجازات في فيزياء القرن التاسع عشر — النظرية الكهرومغناطيسية في الضوء — كان بها من العيوب ما أدى إلى ضرورة ظهور وإعادة صياغة شيئين هامين: نظرية النسبية لأينشتاين ونظرية الكم. وبالرغم من أن أينشتاين لعب دورًا محوريًّا في التطورات المبكرة لنظرية الكم فإنه ليس هناك أي شيء يمكن أن يتفرد مثل العبقري الفذ الذي قاد كل الآخرين إلى تطوير النظرية الجديدة. وبحلول القرن العشرين، أصبح العلم عملًا عالي المستوى جدًّا، وأصبح العلماء على دراية كبيرة بما يعمله كل منهم. ونتيجة لذلك أصبح هناك أفراد أكثر كثيرًا في مواقع يستطيعون منها تقديم إسهامات ذات فائدة كبيرة.

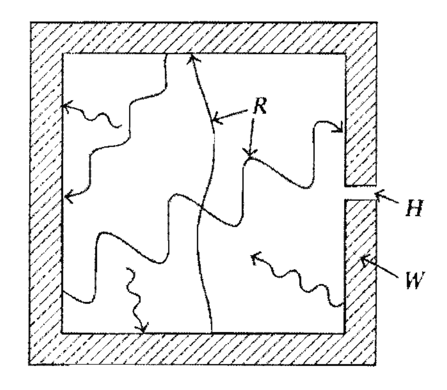
سنطرق نظرية الكم من خلال فحص بعض تلك المشاكل العلمية للقرن التاسع عشر، ومضامينها (١) مشكلة إشعاع الجسم الأسود. (٢) التأثير الكهروضوئي. و(٣) الطيف والبنية الذرية. أُعدت هذه المشاكل بترتيب أهميتها كما أدركها معظم الفيزيائيين بنهاية القرن التاسع عشر. ومن المؤكد أن مشكلة الجسم الأسود تعتبر مشكلة ثانوية، إلا أن حل تلك المشكلة قد وضع البذور التي أدت إلى نظرية الكم الكاملة. وفي الواقع فإن المشكلات الثلاث متداخلة فيما بينها بقدر كبير، وأصبح إيجاد حل لها لم يكن لمصلحة العلم فقط بل لمناطق كبيرة أيضًا في العلوم التطبيقية.

إشعاع الفجوة أو إشعاع الجسم الأسود

من الأمور المعروفة عمومًا أن الأجسام المعدنية يتغير لونها عندما تسخن. فمثلًا: عند تسخين قضيب من الحديد، يبدأ في التوهج ويصير لونه أحمر باهتًا ثم يتحول إلى أحمر قرمزي وأخيرًا إلى أحمر برتقالي ناصع أو أصفر. وفي النهاية ينصهر الحديد، ولكن استبدال الحديد بقطعة من سلك التنجستن في فراغ مغلق أو في جو من غاز خامل يحافظ عليها من التفاعل الكيميائي مع الهواء، ورفع درجة حرارتها إلى درجة عالية، وكلما زاد التسخين، تغير لون الضوء المنبعث، وهكذا يتغير اللون من أصفر ناصع إلى أبيض متوهج. وإذا وضع السلك في أنبوبة زجاجية محكمة الإغلاق وتم التسخين كهربيًّا فإننا نحصل على مصباح كهربي متوهج. في الواقع لا ينبعث ضوء من لون واحد، لكن ينبعث مدى من الألوان المتغيرة الشدة. وينبعث من السلك الأبيض الساخنِ المتوهجِ الضوءُ البنفسجي والأزرق والأخضر والأصفر والبرتقالي والأحمر (وكل الألوان التي في المنتصف) التي يمكن أن نراها، وأيضًا «ألوان» الطيف الكهرومغناطيسية التي لا نستطيع رؤيتها، مثل تحت الحمراء وفوق البنفسجية، وهذه كلها يمكن التحقق من وجودها باستخدام الأجهزة المناسبة.

وبالتأكيد، وفي وجود مفاهيم الديناميكا الحرارية المختلفة التي نوقشت في الفصول السابقة وأيضًا مفاهيم نظرية الحركة الجزيئية للمادة والنظرية الكهرومغناطيسية للضوء، لا بد أنه من الممكن فهم العلاقة بين التسخين الذي تم لقضيب الحديد أو سلك التنجستين، والحرارة المكتسبة، ومدى وشدة طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث. فبحصول الجامد على الطاقة الحرارية، تزداد الطاقة الحركية للجزيئات ولمكوناتها. وبصفة خاصة، تكتسب أجزاء الذرات المشحونة كهربيًّا طاقة أكبر وتزداد حركتها ذهابًا وأيابا. ولكننا نعرف من النظرية الكهرومغناطيسية للضوء أن حركة الشحنة الكهربية ذهابًا وإيابا (التذبذب) تنتج طاقة الإشعاع الكهرومغناطيسي. فإذا كان التذبذب عالي التردد بما فيه الكفاية، سيشع الضوء المرئي. وبزيادة درجة حرارة الجامد، يزداد مدى سعة وتردد التذبذب الذري أو الجزيئي ويزداد مدى وشدة الإشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث. وهكذا يمكن نوعيًّا فهم كيف يمكن للجسم الساخن أن يبعث الضوء.

وتتكون الخطوة التالية لفهم الإشعاع الناتج من الأجسام الساخنة من تناول الأفكار المذكورة أعلاه ووضعها على أسس كمية أكثر وإجراء قياسات تجريبية تفصيلية لاختبار دقة الحسابات. وسرعان ما يتم التحقق بأن مقدار الإشعاع المنبعث



شكل ٧-٢: المشع المثالي للفجوة أو الجسم الأسود. R إشعاعات من أطوال موجات متنوعة يتم تبادلها بواسطة مذبذبات. W حوائط الفجوة في درجة حرارة مرتفعة. H ثقب يشاهد الإشعاع من خلاله.

من الأجسام الساخنة يعتمد على ظروف وطبيعة تلك الأجسام وأيضا على حجمها وعلى درجة الحرارة. وهكذا فمن الضروري أن نأخذ حالة «مثالية» تمامًا، كما حدث للجسم الساقط بحرية عند جاليليو ونيوتن؛ كحالة مثالية، وأيضًا مثل آلة كارنوت التي تمثل آلة مثالية.

ويُظهر تحليل الموقف أن أفضل باعث أو الباعث المثالي للإشعاع الكهرومغناطيسي عند درجة حرارة مرتفعة هو أيضًا أفضل ماص للإشعاع. والسطح الذي يستطيع *بسهولة أن يمتص كل ترددات (ألوان) الضوء يمكنه أيضًا أن يبعث بسهولة كل* الترددات، وبالتبعية فإن أفضل باعث يجب أن يكون له سطح أسود. وأكثر من ذلك، فالسطح الأبيض (أو الذي فوقه عاكس) سيكون ماصًّا رديئًا وباعثًا رديئًا للإشعاع أيضًا. ويستخدم الرحالة هذه الحقائق في الصحراء: تعكس الثياب البيضاء حرارة الشمس بدلًا من امتصاصها أثناء النهار وتحتفظ أثناء الليل بحرارة أجسامهم. وبالمثل فاستخدام رقائق الألومنيوم العاكسة لعزل المباني تقلل من فقد الحرارة أثناء الشتاء كما تقلل من اكتسابها أثناء الصيف.

كيف للمرء أن يصنع سطحًا أسود حقيقيًّا؟ وبخصوص الموضوع ذاته، ماذا نعني بالسطح الأسود؟ السطح الأسود الحقيقي هو ذلك السطح الذي لا يستطيع ضوء ساقط الهرب منه مطلقًا. وأي ضوء يستخدم ليضيء مثل هذا السطح لا يمكن رؤيته. ويمكن تخيل جزء من مثل هذا السطح (كما هو مبين بالشكل ٧-٢) بالأخذ في الاعتبار جسمًا أجوف به ثقب يوصل داخله بالسطح الخارجي. وينفذ أي ضوء ساقط على الثقب إلى الداخل، حتى ولو كان سينعكس عدة مرات من الحوائط

الداخلية، فإنه لن يجد طريقة ثانية للهرب من الثقب. إنه الثقب الذي يمثل «سطحًا» مثاليًّا لامتصاص الإشعاع. ومن جهة أخرى، فإذا سُخنت الحوائط الداخلية للفجوة، فستمثل الإشعاعات القادمة من الثقب الإشعاعات المنبثقة بواسطة الباعث المثالي للإشعاع. وهكذا يطلق على المشع المثالي أو الجسم الأسود المشع أيضًا الفجوة المشعة. ويمكن للمرء أن «يُقرب» الفجوة المشعة بوضع ستار معتم محكم وبه ثقب صغير فوق فتحة موقد. وبإشعال النار في الموقد سيصبح الثقب هو «سطح» الجسم الأسود.

من الممكن أن نبين أن الطاقة المنبعثة بواسطة الفجوة «المشع المثالي» تعتمد فقط على درجة حرارة المشع ولا تعتمد على أي تفاصيل عن كيفية تولد الطاقة داخل الفجوة. وهكذا عند تحليل الفجوة المشعة، من الضروري فقط أن نفترض أن الذرات على حوائط الفجوة تكون في حالة اتزان حراري فيما بينها، وعليه يكون لها نفس متوسط طاقة الحركة لكل ذرة. وعند أي لحظة معينة، قد يكون لبعض الذرات طاقة أعلى أو طاقة أقل، وربما تتغير الذرات المنفردة التي لها طاقة أعلى أو طاقة أقل بمرور الوقت، لكن متوسط الطاقة ثابت. وتنتج التغيرات في طاقة الذرات المنفردة من تداخل الذرات بعضها مع البعض، إما عن طريق التزاوج من خلال الترابط الكيميائي أو عن طريق انبثاق أو امتصاص الإشعاع من الذرات الأخرى عبر الفراغ في الفجوة. وفي الواقع إن طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث والممتص — مدى تردد الإشعاع وشدته عند الترددات المتنوعة — هو ممثل للتوزيع أو للمشاركة النسبية للطاقة الكلية بين الترددات المختلفة أو بين أنماط الحركة المختلفة. وحيث إن إشعاع الحركة المغناطيسية يعتمد على تذبذبات الشحنات الكهربية، فمن المفيد مناقشة انبعاث الطاقة الكهرومغناطيسية بمدلول «الذبذبات» الذرية أو الجزيئية الموجودة داخل الذرات أو الجزيئات المنفردة.

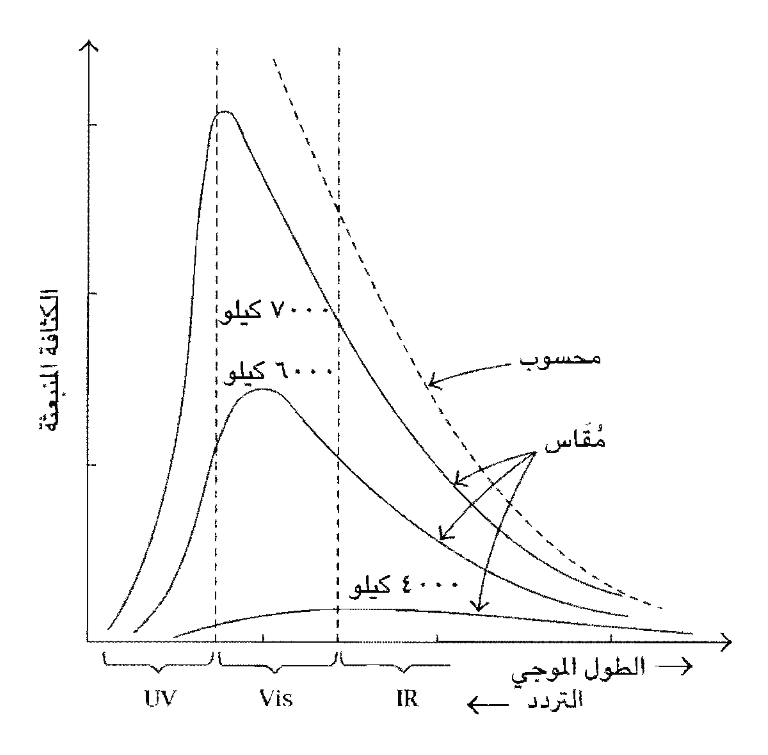
التحركات المحتملة للذرات أو الجزيئات المنفردة معقدة تمامًا لكن يمكن تحليلها بمدلول حركات تشبه الزنبرك الأبسط لعدد من التذبذبات المختلفة، كل منها يتذبذب (يهتز) وفق تردد مميز خاص به. وعندئذ تكون الحركة الكلية للذرات أو الجزيئات هي مجموع الحركات المختلفة للمتذبذبات المنفردة تمامًا مثل حركة التأرجح لراكب سيارة تسير في طريق مليء بالمطبات، والحركة هنا تتجه إلى أعلى وأسفل وإلى الجانبين، ويتوقف ذلك على زنبرك العجلات وعلى تأرجح الإطارات وعلى وسادات المقاعد.

وهكذا فإن عدد المتذبذبات النشطة عند كل تردد معين هو الذي يحدد انبعاث الطيف الكهرومغناطيسي بواسطة الفجوة. وعلى عكس ذلك، إذا درسنا وقسنا الطيف الكهرومغناطيسي المنبعث وأجرينا التحاليل الرياضية المناسبة، فمن الممكن استنباط الأسلوب الذي توزعت به الطاقة الحرارية الكلية للنظام بين التذبذبات المتفرعة عند أي درجة حرارة.

ويمكن حساب توزيع الطاقة، أو كما يطلق عليه معامل التجزئة، وفقًا لمبادئ الديناميكا الحرارية مستخدمين المفاهيم المختلفة للطاقة والإنتروبيا التي نوقشت في الفصول السابقة. وعند مقارنة النتائج بنتائج القياسات التجريبية الفعلية للطيف كما هو مبين بالشكل ٧-٣ حيث يظهر الطيف المحسوب عند ٧٠٠٠ كلفن بالخط المتقطع والطيف الفعلي عند ٤٠٠٠، ٦٠٠٠، ٧٠٠٠ كلفن بالخط المتصل. لاحظ أنه في هذا الشكل يمثل المحور الأفقي طول الموجة، المتناسب عكسيًّا مع التردد، وهكذا يزداد طول الموجة إلى اليمين بينما يزداد التردد إلى اليسار. ويتناسب مقدار مساحة معينة تحت منحنى درجة حرارة معينة مع الطاقة الكلية المنبعثة بواسطة الفجوة. وكما أشرنا من قبل، فالمنحنيات المبينة في شكل ٧-٣ تعتمد على درجة الحرارة فقط ولا تعتمد على التفاصيل المعينة الخاصة بالبنية الذرية أو الجزيئية، تمامًا مثل مسلك كل آلات كارنوت التي لا تعتمد على تصميمها التفصيلي وتعتمد فقط على درجة الحرارة.

واضح أن الحسابات تتفق مع التجربة عندما يكون طول الموجة كبيرًا ويصبح عدم الاتفاق أكثر وضوحًا عندما يقل طول الموجة (ويزداد التردد). وفي الواقع، عندما كان طول الموجة قصيرًا (التردد عالي)، أي تلك المنطقة التي ترمز إلى المنطقة البنفسجية من الطيف، كان عدم الاتفاق بين النظرية والتجربة مثيرًا لدرجة أنه كان كارثيًّا. وأصبح يعرف عدم الاتفاق هذا بالكارثة فوق البنفسجية (طبيعي أنها كارثية فقط للنظرية ولهؤلاء الذين يريدون أن يعتقدوا في النظرية). ولتوضيح مدى عدم الاتفاق هذا، أصبح واضحًا أن النتائج النظرية تتعارض مع مبدأ الاحتفاظ بالطاقة، في نفس الوقت الذي فيه الاحتفاظ بالطاقة هو واحد من الأركان الأساسية لنظرية الديناميكا الحرارية. وهكذا تناقض النظرية حتى نفسها!

نشر عالم الفيزياء النظرية ماكس بلانك سنة ١٨٩٩ تحليلًا للمشكلة، حوّر فيه النظرية لتجنب كارثة الأشعة فوق البنفسجية. كان هذا التحوير هو الذي بدأ تطوير نظرية الكم. أيقن بلانك أن النظرية الحالية، بمتطلباتها تفرض على كل



شكل ٧-٣: طيف إشعاع الفجوة أو الجسم الأسود. الخط المتقطع محسوب وفقًا لنظرية كلاسيكية عند درجة ٧٠٠٠ كلفن. الخطوط المتصلة قياسات عند درجات الحرارة المشار إليها. لاحظ مناطق الطيف المشار إليها: UV فوق البنفسجية، Vis الضوء المرئي، IR تحت الحمراء.

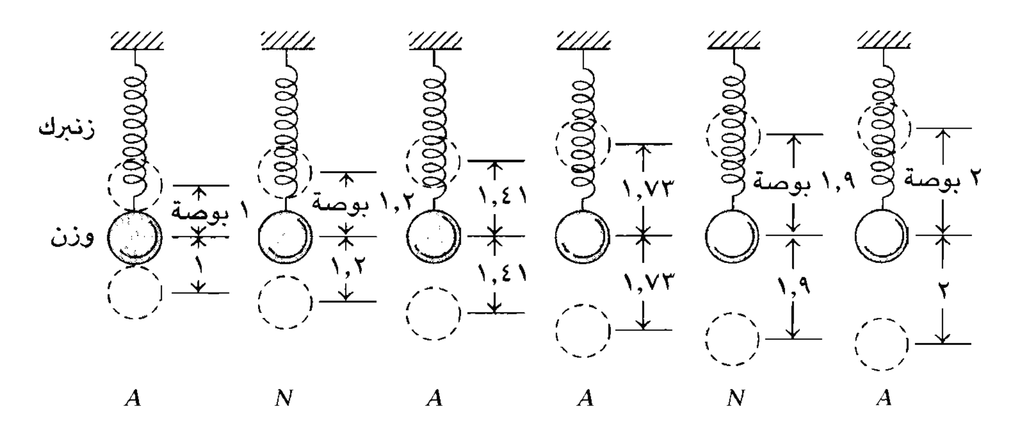
المتذبذبات في المتوسط أن يكون لها نفس الطاقة لكل متذبذب. أدى ذلك إلى كارثة الأشعة فوق البنفسجية لأن هناك عددًا أكبر كثيرًا من المتذبذبات عند تردد أعلى عن تلك التي عند تردد منخفض. لكن النتائج التجريبية (شكل ٧-٣) تظهر بوضوح أن متوسط الطاقة لكل متذبذب يجب أن تقل كلما انخفض تردد المتذبذب. وهذا يعني أن عددًا قليلًا من المتذبذبات ذات التردد العالي المتاحة سيكون نشيطًا. ولا بد من طريقة ما لتمييز المتذبذبات ذات التردد العالي للحفاظ عليها من أن يكون لها نفس متوسط الطاقة كمتذبذبات التردد المنخفض. لكن المتذبذبات، ولأنها تتواجد في ذرات الجسم الساخن، يجب أن تتداخل وتتقاسم الطاقة فيما بينها. وهكذا، فالسؤال هو كيف للمتذبذبات أن تتبادل الطاقة وتظل متذبذبات عالية التردد ولها طاقة أقل في المتوسط لكل متذبذب عن متذبذبات التردد الأقل.

كان حل بلانك العبقري لهذه المشكلة هو اقتراح أنه في أي حالة يكتسب فيها المتذبذب طاقة أو يفقد طاقة، فإن التغير في الطاقة لا يمكن أن يحدث إلا على شكل

وحدات من الطاقة ذات كميات دنيا معينة، سماها هو كوانتات الطاقة. وهكذا يمكن لمتذبذب أن يكتسب (أو يفقد) كوانتم واحدًا من الطاقة أو اثنين أو ثلاثة أو أربعة، وهكذا لا يمكن أيضًا أن يكون نصف كوانتم أو ربع كوانتم أو أي جزء من كوانتم. وأكثر من ذلك فكل متذبذب له كوانتم ذو حجم خاص به يتناسب مع تردده. فالمتذبذب ذو التردد العالي قد يكون له كوانتم أكبر من المتذبذب المنخفض. وبين بلانك عندئذ أن هذا سيؤدي إلى أن تستقبل المتذبذبات ذات التردد المنخفض طاقة أكبر في المتوسط عن المتذبذبات ذات التردد العالي.

فمثلًا، إذا تداخل متذبذبان معًا وكان أحدهما له تردد يعادل ضعف تردد المتذبذب الآخر فسيكون حجم الكوانتم الخاص به ضعف المتذبذب الآخر، فإذا «أراد» المتذبذب ذو التردد العالي أن يفقد بعضًا من طاقته للمتذبذب ذي التردد المنخفض نتيجة للتداخل، فسيكون الكوانتم الخاص به مكافئًا لاثنين من كوانتات المتذبذب المنخفض التردد، وسيقبل المتذبذب ذو التردد المنخفض طاقة، وبذلك تزيد طاقته بمقدار اثنين من كوانتاته. ولكن افترض الآن أن المتذبذب المنخفض التردد «يريد» أن يفقد بعضًا من طاقته، واحدًا من كوانتاته يعادل نصف حجم الكوانتم المطلوب للمتذبذب العالي التردد، وعليه فلن يقبل المتذبذب العالي التردد تلك الطاقة. فالمتذبذب المنخفض التردد لا يستطيع أن يفقد فقط كوانتم واحدًا إلى المتذبذب العالي التردد، وهكذا لا بد من فقده الكوانتم إلى متذبذب متوافق معه. ويقبل المتذبذب العالي التردد الطاقة من المتذبذب المنخفض التردد فقط في حالة أن يتنازل الأخير عن كوانتين (أو مضاعفات اثنين). ونتيجة لذلك فإن احتمال اكتساب المتذبذب عالي التردد طاقة من متذبذب منخفض التردد تقل، ولذلك لا بد أن يقل متوسط طاقته.

نستطيع أن نجري تشبيهًا وهميًّا لذلك الموقف بأن نتخيل مجتمعًا يتداخل فيه الناس ببيع وشراء بضائع وخدمات متنوعة فيما بينهم. يرغب بعض أعضاء ذلك المجتمع أن يتعاملوا بأوراق مالية من فئة دولار واحد أو أكثر فقط، وآخرون على استعداد أن يتعاملوا بأوراق مالية من فئة دولارين أو أكثر فقط، ومجموعة أخرى على استعداد للتعامل بأوراق مالية من فئة خمسة دولارات، والبعض الآخر يتعامل بفئة ١٠٠٠ دولار فقط، وهكذا. فإذا أراد «المسرف» أن يشتري كوبًا من اللبن أو حذاء فلا بد أن يدفع ١٠٠٠ دولار مثلًا، ولا يحصل على باقي. ومن جهة أخرى فكل ما لديه من أصناف معروضة للبيع بقيمة ألف دولار، وللحظ السيئ فالتعاملات التي تتطلب ١٠٠٠ دولار لا تحدث كثيرًا، ونتيجة لذلك سينتهي الحال «بالمسرف»



شكل ٧-٤: سعات المتذبذب. A مسموح، N غير مسموح.

وليس معه الكثير من النقود بعد قليل من التعاملات. ومن الناحية الأخرى يستطيع «المقتصد» أن يقوم بعدد كبير من التعاملات ويجمع قدرًا معقولًا نسبيًّا من المال.

بإدخال هذه الفكرة في النظرية استطاع بلانك أن يحسب معامل التوزيع الطيفي الذي كان على اتفاق تام مع القيم التجريبية.

لم يكن بلانك سعيدًا كلية بأفكاره الكمية لأنها تجرح تنتهك بعض إحساساته الفطرية حول الطاقة. وسيوضح المثال البسيط التالي ما كان يقلقه.

تخيل متذبذب عبارة عن وزن معين معلق في زنبرك كما في الشكل ٧-٤. وعند سحب الوزن إلى أسفل من موقعة المتزن (وليكن بمقدار بوصة واحدة) ثم تركه، سيتأرجح ذلك الوزن إلى أعلى وإلى أسفل بتردد يعتمد أساسًا على الوزن نفسه وعلى صلابة الزنبرك والسعة ذات المدى بوصة واحدة (أي أن التأرجح بين أقصى الموقعين هو بوصة واحدة من موقع الاتزان). وإذا سُحب الوزن إلى أسفل مسافة بوصتين، فسيكون التردد كما في المرة السابقة، لكن المسافة القصوى للتذبذب ستكون بوصتين من موقع الاتزان. وستكون الطاقة الكلية (طاقة حركة وطاقة وضعية) المرتبطة بالتذبذب في الحالة الثانية تساوي أربعة أضعاف الحالة الأولى (تتناسب الطاقة مع مربع سعة التذبذب). فإذا سُحب الوزن إلى أسفل مسافة ١,٢ بوصة تصبح الطاقة ١,٤٤ مرة أكبر مما في الحالة الأولى.

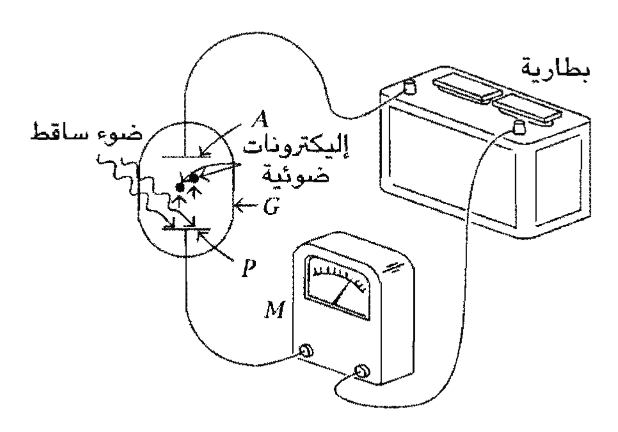
إلا أن ذلك ليس ممكنًا، وفقًا لفرضية بلانك، لأن طاقة التذبذب لا بد أن تكون الضعف تمامًا أو ثلاث مرات أو أربع مرات الكمية الأصلية وهكذا. فإذا

سُحب الوزن مسافة تساوي ١,٤١٤٢١٣٥ بوصة (الجذر التربيعي للعدد ٢) فعندئذ تكون طاقة التذبذب ضعف الطاقة الأصلية وهذا مسموح به. ولن يسمح بسعة ما بين بوصة واحدة و١,٤١٤٢١٣٥٠٠ بوصة. وبالمثل لا يسمح بسعة بين ١,٤١٤٢١٣٥٠٠٠ و١,٧٣٢٠٥٠٨٠٠ (الجذر التربيعي للرقم ٣). ولا يسمح لسعة ما بين ١,٧٣٢٠٥٠٨٠٠٠ بوصة و٢ (الجذر التربيعي لرقم ٤)، لكن يسمح لسعة مقدارها بوصتان. ولا يسمح بسعة بين بوصتين، وهكذا.

كان بلانك يعلم أن هذا خطأ على المدى الكبير، ولم ير أي سبب في أن يكون صحيحًا على المدى الذري. وفي الواقع، لقد قضى فترة لا بأس بها يحاول أن يجد طريقة أخرى للتخلص من كارثة الأشعة فوق البنفسجية بإدخال المفهوم الكلي، لكن جهوده كانت بلا فائدة.

يمكن أن نبين، في الواقع، أن المفاهيم الكمية لا تتعارض مع الحقائق المشاهدة على المستوى الكبير، ولفهم ذلك يجب علينا إعادة فحص العلاقة بين حجم الكوانتم وتردد المتذبذب. يتناسب حجم الكوانتم مع تردد المتذبذب لكن ثابت التناسب (وهو ما يطلق عليه ثابت بلانك) هو عدد ضئيل (علامة عشرية يتبعها ٣٣ صفرًا ثم ٦ في المكان الرابع والثلاثين في النظام الصحيح للوحدات) لدرجة أن طاقة الكم للزنبرك جزء صغير جدًّا من الطاقة الكلية للزنبرك. ونتيجة لذلك، فإن إضافة كوانتم واحد أو أكثر إلى عدد كبير مطلوب لسعة بوصة واحدة ينتج عنه تغير ضئيل في السعة المسموح بها للدرجة التي من غير الممكن ملاحظتها، حتى لو كان التغير أقل في السعة التي لا يسمح بها ... وهكذا، ولكل الأغراض «العملية» تتغير السعة المسموح بها بهدوء. وهذا هو مثال للفكرة التي سبق التعبير عنها في الجزء السابق والشكل ٧-١ بأن نظرية الكم تعطي نتائج للأشياء الكبيرة لا تختلف عن النظرية الكلاسيكية. ولكن بالنسبة للمتذبذبات الذرية، فإن نظرية الكم تعطي نتائج مختلفة وصحيحة تمامًا. وما يؤدي إلى فشل النظرية الكلاسيكية هو محاولة استخدام النظرة السليمة على المدى الكبير على ظواهر دون الميكروسكوبية.

ولقد تم تقدير قيمة ثابت بلانك، الذي يرمز إليه بالرمز h، بواسطة بلانك بمقارنة مباشرة لنظريته مع القياسات التجريبية لطيف إشعاع الفجوة. وحصل بلانك على جائزة نوبل في الفيزياء نتيجة حله لمشكلة إشعاع الفجوة.



شكل ٧-٥: رسم تخطيطي للظاهرة الكهروضوئية. A آنود، P كاثود ضوئي، M جهاز لقياس التيار، G مصباح زجاجي مفرغ من الداخل.

التأثير الكهروضوئي

لاحظ هنريتش هيرتز سنة ١٨٨٧ التأثير الكهروضوئي أول مرة أثناء عمله في تجارب للتحقق من نظرية ماكسويل الكهرومغناطيسية للإشعاع. تقوم هذه الظاهرة في الأساس على حقيقة أنه يمكن للتيار الكهربي أن ينتقل في الفراغ الخالي بين جسمين في مكان منعزل تمامًا، دون ارتباط بأسلاك، عندما يكون أحد الجسمين متوهجًا نتيجة للإضاءة. وذلك موضح تخطيطيًّا في الشكل ٧-٥، حيث نرى بطارية كهربية متصلة بلوحين مثبتة في وعاء مفرغ من الهواء. يسمى أحد الألواح الكاثود الضوئي (Photocathode)، ويتصل بالقطب السالب للبطارية، واللوح الثاني يسمى الآنود (anode) ويرتبط بالقطب الموجب. فإذا كان الكاثود الضوئي متوهجًا بالإضاءة فقط، فسيبين المؤشر في الدائرة أن التيار الكهربي قد سرى. وقد برهنت تجارب متنوعة أن التيار الكهربي بين اللوحين عبارة عن أجزاء دقيقة من مادة، تحمل شحنات كهربية سالبة، تبدأ من الكاثود الضوئي وتتسارع نحو القطب الموجب. هذه القطع الدقيقة من المادة هي الإلكترونات (اكتشفها فيزيائي إنجليزي يدعى طومسون). ويطلق عليها في حالة التأثير الكهروضوئي الإلكترونات الضوئية. ويستخدم التأثير الكهروضوئي في الابتكارات المتنوعة مثل فتح الأبواب الآلي، والمؤثرات الصوتية في الأفلام السينمائية، والتحكم في إغلاق كاميرات التصوير، وأجهزة الإنذار وعدد آخر من أجهزة كشف مستوى الضوء وقياس والشحنات التي فيه.

يمكن إعطاء تفسير معقول نوعيًّا، لظاهرة التأثير الكهروضوئي بمدلولات النظرية الكهرومغناطيسية الكلاسيكية للضوء. وكما شرحنا في الفصل السادس

فموجة الضوء الكهرومغناطيسي تتكون من مجالات كهربية ومغناطيسية تتأرجح وتنتشر. ويجبر المجال الكهربي الإلكترونات على التذبذب ويمنحها طاقة كافية، فإذا كانت سعة تلك الموجات كبيرة بما فيه الكفاية لتحطيم الرابطة الكيميائية لهذه الإلكترونات مع السطح، فهي بذلك تسمح للإلكترون أن ينفصل من السطح عند تطبيق جهد كهربي.

وعلى كل عندما درست الظاهرة في المراحل الأولى، لم يكن من الممكن تفسير بعض النتائج التي تبدو متناقضة. فبعض ألوان الضوء، مهما كان بريقها، لم تحدث التأثير الكهروضوئي عند استخدام مواد معينة ككاثودات ضوئية، بينما تحدث ألوان أخرى الظاهرة بالرغم من أن شدتها أقل كثيرًا من شدة الألوان الأولى. فمثلًا، أكثر الألوان الأصفر شدة لا تحدث التأثير الكهروضوئي في فلز مثل النحاس، بينما يحدث ضوء الأشعة فوق البنفسجية التأثير الكهروضوئي في النحاس حتى لو كان الضوء ضعيفًا (هناك أيضًا تأثيرات كهروضوئية تسببها ظروف سطح الكاثود الضوئي، وبذلك أعطت التجارب نتائج متضاربة).

يمكن تخيل هذا التناقض بالتماثل مع ارتطام موجات البحر بالشاطئ. فعندما تصل الموجات إلى الشاطئ تلتقط الحصى والأخشاب والأنقاض الأخرى وتلقيها بعيدًا على الشاطئ. ولكن، على شواطئ معينة وفي أيام معينة، وإذا كانت المسافة بين قمم الموجات كبيرة جدًا، فإن تلك الموجات لن تحرك ولو حصاة واحدة. وعلى الجانب الآخر إذا كانت المسافة بين قمم الموجات صغيرة بما فيه الكفاية، فستلقي أقل التموجات بالحصى بعيدًا عن الشاطئ!

اقترح أينشتاين في النهاية سنة ١٩٠٥ (وهي نفس السنة التي نشر فيها بحثه الأول عن النظرية النسبية الخاصة وإسهامات هامة عديدة أخرى) نظرية عن التأثير الكهروضوئي. أطلق أينشتاين عليها نظرية مساعدة؛ لأنها أدت الغرض، مع أنه لم يستطع تبريرها على أساس المبادئ الأساسية المقبولة.

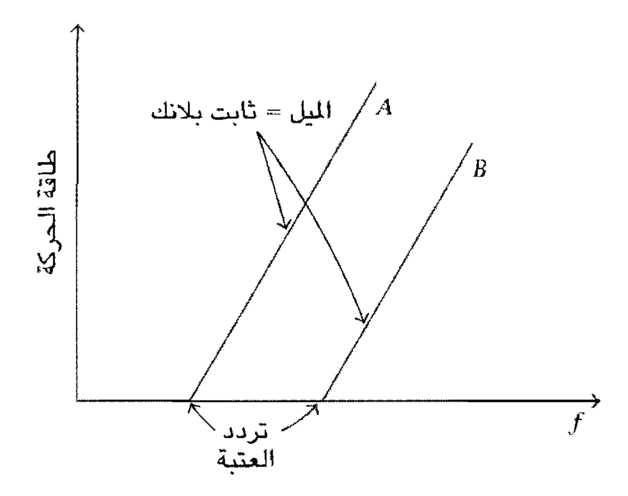
اقترح أينشتاين أن طاقة الضوء قد انتقلت على شكل حزم أو كوانتات من الطاقة واستعار في ذلك فرضية الكم لبلانك وطورها. وفي نفس الوقت، حافظ على الموجات كوسيلة للانتقال. واقترح أن كوانتات الضوء يجب أن يكون لها اسم خاص هو الفوتون. وتعتمد طاقة كل فوتون ضوئي على لون الضوء، وبصفة خاصة، على تردده f. (ولنتذكر أنه وفقًا لنظرية الموجة للضوء، فإن موجة الضوء لها طول موجة λ، وهي المسافة بين قمتي موجتين متتابعتين، والتردد f عدد مرات تذبذب

الموجة ذهابًا وإيابًا في الثانية. ولنتذكر أيضًا أن طول الموجة مضروبًا في التردد يعطي سرعة الضوء ١٨٦٠٠٠ ميل/ثانية.) وباستخدام ثابت بلانك h تكون طاقة الفوتون تساوي hf.

ويجب أن يتقبل السطح فوتونات كاملة وليس أجزاءً من الفوتونات إذا امتص أي طاقة ضوء. وفي الواقع، إن الإلكترونات داخل السطح هي التي تقبل طاقة الفوتون. وإذا أعطى الفوتون المنفرد الإلكترون قدرًا من الطاقة أكبر من طاقة ربطه، يمكن للإلكترون أن يهرب من السطح. وإذا لم يعط الفوتون طاقة كافية للإلكترون، فلن يستطيع الهروب من السطح؛ «سيهيم» ببساطة داخل الجامد ويستهلك الطاقة المكتسبة بامتصاص الفوتون. وعادة ليس من الممكن للإلكترون أن يحتفظ بالطاقة من الامتصاصات المتتابعة للفوتونات؛ فإما أن يهرب أو يستهلك الطاقة قبل فرصة امتصاص فوتون آخر. فإذا كانت طاقة الفوتون الممتصة أكبر من طاقة الربط فستظهر الطاقة الزائدة كطاقة حركة للإلكترون الضوئي. وستتناسب كمية طاقة الحركة مع طاقة الفوتون الزائدة.

وتنبأت نظرية أينشتاين أنه إذا أجريت تجربة لقياس طاقة الحركة العظمى للإلكترونات الضوئية عند خروجها من السطح، وذلك برسم العلاقة بين طاقة الحركة العظمى وتردد الضوء فلا بد من الحصول على خط مستقيم بدءًا من تردد معين، يكون مميزًا لمادة الكاثود الضوئي وظروف السطح. وأكثر من ذلك، فقد تنبأ بأن ميل (أو انحدار) الخط بالوحدات المناسبة يتساوى تمامًا مع ثابت بلانك. ويظهر مثل هذا الرسم البياني في الشكل ٧-٦. ورصد الأمريكي روبرت ميليكان بعد حوالي تسع سنوات سنة ١٩١٤ أول سلسلة من القياسات محققًا النظرية المساعدة ومبينًا أن الظاهرة الكهروضوئية يمكن أن تستخدم لقياس ثابت بلانك دون الاعتماد على مشكلة إشعاع الجسم الأسود. وحصل أينشتاين على جائزة نوبل لتحليله التأثير الكهروضوئي (وليس على النظرية النسبية) وحصل أيضًا ميليكان على جائزة نوبل على دراساته التجريبية على التأثير الكهروضوئي.

حملت فرضية الفوتون معها بعض التضمينات حول طبيعة الضوء التي لم تكن لتتوقع من النظرية الكهرومغناطيسية. فمن ناحية، كان من الضروري اعتبار أن الفوتونات مدمجة هندسيًّا، أي أن الفوتون يتحرك مثل القذيفة وليس كموجة، وإلا فإن طاقة فوتون فريد قد تنتشر في جبهة موجة قطرها عدة أقدام — أو حتى عدة ياردات. وعندئذ عندما يُمتص الفوتون، فكل طاقته «يتم التهامها» لحظيًّا من

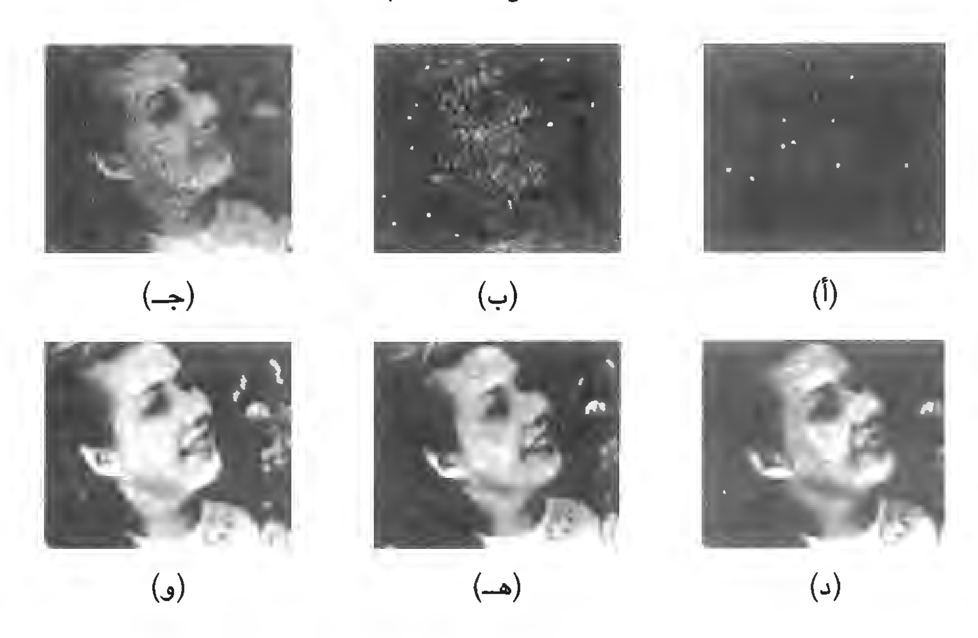


شكل ٧-٦: تنبؤ أينشتاين بالعلاقة بين طاقة الفوتوإلكترون القصوى والتردد. KE طاقة الحركة القصوى للفوتوإلكترون، f تردد الضوء الساقط، A, B مادتان مختلفتان، Thr حد التردد.

كل أجزاء جبهة الموجة وتتركز على موقع الفوتوإلكترون. وهو الأمر الذي لا تسمح به النظرية النسبية لأنه بذلك سيكون على الطاقة أن تتحرك بسرعة أكبر من سرعة الضوء. وأصر أينشتاين على أن طاقة الفوتون قد تم امتصاصها عند نقطة معينة ولذلك فإن الفوتون نفسه لا بد أن يكون حزمة مركزة من الطاقة.

وفي الواقع، هناك أدلة أخرى على أن امتصاص الضوء يتطلب فرضية الفوتون. وواحد من مثل هذه الأدلة العادية هي تحبب الصور الفوتوغرافية التي لم تتعرض للضوء بما فيه الكفاية. فإذا أخذت نيجاتيف الصورة وعرضتها للفترة الزمنية المناسبة، فستحصل على الصورة الموجبة. أما إذا تعرض النجاتيف إلى كمية ضئيلة من الضوء، فستظهر الصورة المطبوعة كنسق غير واضح المعالم به قليل من النقط. وإذا ازداد زمن التعرض في طبعات متتالية بمقدار صغير، تبدأ النقاط بتجميع نفسها إحصائيًّا في الإطار الخارجي الخالي للصورة المحددة المعالم. وبزيادة زمن التعرض يتجمع مثل هذا العدد الكبير من النقاط إلى أن يصبح الإحصاء طاغيًا وتحصل على الصورة النهائية، وهو موضح في الشكل ٧-٧. وتمثل كل نقطة امتصاص الفوتون عند نقطة معينة، مما يؤكد أن طاقة الفوتون مركزة هندسيًا.

ويظهر عرض دراسي آخر لطبيعة «القذيفة» الضوئية هذه بواسطة تأثير كومبتون. وفي ذلك التأثير يُسمح لشعاع من الأشعة السينية (تعرف بأنها إشعاعات



شكل ٧-٧: التحبب وإحصائية تسويد الصور الفوتوغرافية. عدد الفوتونات المتضمنة في زيادة تفاصيل إنتاج نفس الصور (أ) ٣٠٠٠ فوتون (ب) ١٢٠٠٠فوتون (جـ) ٩٣٠٠٠ فوتون (د) ٧٥٠٠٠٠ فوتون (هـ) ٣٦٠٠٠٠٠ فوتون (و) ٢٨٠٠٠٠٠٠ فوتون (بإذن من د. ألبرت روز).

كهرومغناطيسية لها طول موجي قصير جدًّا) وهي «ترتد» عن بعض الإلكترونات. لقد وُجد أن الإلكترونات ترتد نتيجة القصف بواسطة الأشعة السينية وأن الأشعة السينية ترتد أيضًا. وفي الواقع، إن طول موجة الأشعة السينية يزداد (وعليه يقل التردد) نتيجة لذلك الارتداد. ويعني هذا أن طاقة الفوتون تقل. إن الأمر وكأن أي فوتون موجود يصطدم بمرونة مع إلكترون مثل اصطدام كرة البلياردو الرئيسية مع كرة بلياردو عادية. ومن الممكن حساب كمية حركة الفوتون (وفقًا لمعادلة سنناقشها فيما بعد)، وقد تبين أنه في هذا التصادم مثل أي تصادم مرن آخر، يتم الحفاظ علي كل من كمية الحركة الكلية وطاقة الجسيمات المتصادمة الكلية (البروتون والإلكترون).

وما زال البرهان على الطبيعة الموجية للضوء طاغيًا لا جدال فيه: التأثيرات المتداخلة (كما عرضنا عن الألوان في فقاعات الصابون) وتأثيرات الحيود (ظاهرة في غياب الظلال المحددة للأشياء وفي سلوك محزوزات الحيود) وتأثيرات الاستقطاب (التي تثبت أن موجات الضوء تتذبذب عموديًّا على اتجاه الانتشار)، وحقيقة أن الضوء العادي يتحرك بسرعة أبطأ عند المرور في الزجاج أكثر من الفراغ الخالي،

والنجاح المذهل والقوة الموحدة للنظرية الكهرومغناطيسية للضوء لماكسويل، كلها ظواهر فُهِمتْ جيدًا وشُرِحتْ بدقة على أساس نظرية الموجة للضوء.

وهكذا كان فيزيائيو القرن العشرين الأوائل يواجهون معضلة. ففي تجارب معينة لهؤلاء الذين يتعاملون بصفة رئيسية مع انبثاق وامتصاص الضوء، كان تطبيق فرضية الفوتون منطقيًّا تمامًا. وعلى الجانب الآخر وفي التجارب الأخرى، مع الذين يتعاملون بشكل رئيسي مع انتشار الضوء (الطريقة التي يتحرك بها الضوء من مكان إلى آخر)، تصلح فرضية الموجة تمامًا. ولقد علق على ذلك أحد الساخرين بأن قال بالتبادل ثلاثة أيام من الأسبوع تدعم التجارب نظرية الفوتون، بينما تثبت الأدلة في ثلاثة أيام أخرى نظرية الموجة، وعليه من الضروري استخدام اليوم السابع من الأسبوع للصلاة من أجل الهداية الإلهية.

وقد تم الإقرار في النهاية أن للضوء طبيعة مزدوجة فعلًا، أي أنه يمكن لخواص الضوء أن تتمشى مع خواص الموجة أو مع خواص الجسيمة (القذيفة) ويعتمد ذلك على تفاصيل التجربة المعنية وتفسيراتها. وفي الواقع خواص كل من الموجة والجسيمة ترتبط إحداهما بالأخرى ارتباطا وثيقًا. ومن الضروري استخدام التردد f، وهو خاصية موجية، لحساب طاقة $E = (hf)$ الفوتون. وبالمثل وكما سنرى فيما بعد، من الضروري استخدام طول الموجة λ لحساب كمية الحركة، وهي خاصية جسيمية.

نواة الذرة والطيف الذري

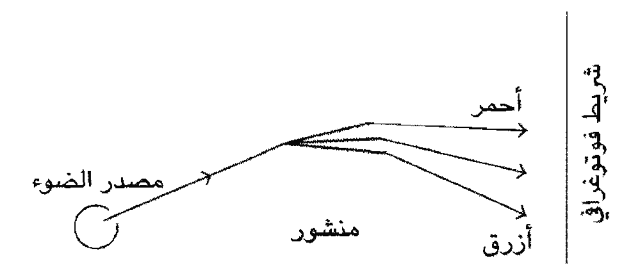
معنى كلمة الذرة حرفيًّا هو: غير قابل للقسمة. ويمكن في الفكر الغربي الرجوع إلى الوراء حوالي ألفين وخمسمائة سنة إلى الإغريقيين ليسيبس وديمقريطس، اللذين اعتقدا أن المادة يمكن تقسيمها إلى أجزاء أصغر، بدورها يمكن تقسيمها إلى أجزاء أصغر، وتلك الأخرى إلى أصغر وهلم جرًّا، حتى في النهاية تصل إلى أصغر حالة للمادة التي لا يمكن تقسيمها أكثر من ذلك، وعندئذ تصل إلى جزء غير قابل للنفاذ من خلاله ولا للتقسيم. وبسط الشاعر الروماني لوكرنيوس هذه الفكرة أكثر بعد حوالي خمسمائة سنة في قصيدة شعرية مطولة عن الفلسفة الأبيقورية. كان في هذه الرؤى المبكرة، أربعة أنواع فقط من الذرات، مرتبطة مع المواد الأساسية لأرسطو. وبدءًا بالكيميائي البريطاني جون دالتون سنة ١٨٠٨، تم الاعتراف أخيرًا بأن هناك عددًا من عناصر المواد، كل منها به ذراتها الخاصة به. وتتميز ربما بشكلها الغريب الخاص بها، وربما يتصل به عدد صغير من «خطافات وعيون» يمكن أن ترتبط

بواسطتها مع ذرات أخرى لتكون الجزيء. وهكذا تم تعريف الجزيء على أنه أصغر جزء من المادة (ليس بالضرورة مادة عنصر). فمثلًا يتكون جزيء الماء من ذرتين من الهيدروجين وذرة من الأكسجين. وهذه المواد التي ليست بعناصر تسمى الآن مركبات. وبالرغم من أن المركبات يمكن تفكيكها إلى عناصر ومن ثم يمكن فصل الجزيئات إلى مكوناتها من الذرات، فالعناصر وذراتها تعتبر في الأساس غير قابلة للتفكيك أو التقسيم.

وأدى مفهوم الحركة للذرات والجزيئات إلى نظرية الحركة الجزيئية للمادة، والإقرار بأن الكيمياء فرع أساسي للفيزياء. وأصبح من الممكن أثناء القرن التاسع عشر تقدير حجم الذرات والجزيئات. وتقع أقطار الذرات في مدى صغير من الأنجسترومات. (الأنجستروم هو وحدة صغيرة جدًّا من وحدات الطول، والبوصة تساوي ٢٥٤ مليون أنجستروم)، ويحتوي كثير من المواد على ذرة واحدة فقط أو قليل من الذرات في الجزيء، وعلى الجانب الآخر فالجزيئات البيولوجية قد تحتوي على مئات أو حتى عدة آلاف من الذرات. وتبذل الذرات في الجزيء أو في الجامد قوى جاذبية بعضها على بعض، وتتغلب بذلك على الحركة العشوائية الحرارية، وتترابط فيما بينها. ومن الممكن إجراء مقارنة تقريبية، لكن مفيدة، بين قوى الترابط و«الزنبرك المرتد» وذلك بربط الذرات المتنوعة بعضها مع البعض (يستخدم الزنبرك بدلًا من الخطاف والعين المذكورين سابقًا)، ولكن من الواضح أن المسلك الفعلي للروابط يجب أن يكون مختلفًا.

ولم يمض وقت طويل إلا وقد ذاعت أعمال دالتون حتى أقر الناس أن المادة لها خواص كهربية. وكان التحقق النهائي لوجود الإلكترون سنة ١٨٩٦ قد أكد أن الذرة نفسها لها بنية كهربية. وفي الواقع ومنذ حوالي ١٥٠ سنة قبل ذلك رأى عالم صربي يدعى بوسكوفيتش — على أسس ميتافيزيقية — أن الذرة قد لا تكون ذلك الجسم الصلب غير القابل للنفاذ مثل ما يُدعى من المفهوم الأصلي لكن لا بد أن يكون للذرة بنية مكانية.

كانت دراسة الطيف الذري لها أهمية خاصة للتيقن من أن الذرات نفسها لها بنية ذاتية، وأصبحت غاية في التطور أثناء القرن التاسع عشر. ويمكن تحت الظروف المناسبة أن نجعل كل المواد تبعث بضوء له ألوان متنوعة. وباستخدام الابتكارات المناسبة مثل المنشور يمكن أن يتحلل هذا الضوء المنبعث إلى ألوان متنوعة التكوين أو ما يطلق عليه الطيف، كما يبدو في الشكل ٧-٨.

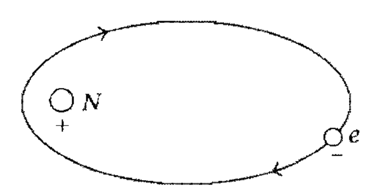


شكل ٧-٨: تشتت الضوء إلى طيف. يتشتت الضوء من المصدر بواسطة المنشور إلى طيف من الألوان (ترددات)، يتم تسجيلها على شريط فوتوغرافي.

هناك وسائل متنوعة لجعل المادة تطلق طيفها، فيمكن تنشيطها حراريًّا باستخدام حرارة وليكن مثلًا حرقها بوقود، أو تنشيطها كهربيًّا بتمرير تيار كهربي عالي الجهد خلالها عندما تكون في الحالة الغازية، أو يمكن إثارتها بضوء لتصبح متألقة. وعند دراسة طيف أبسط المواد — العناصر، نرى أنها معقدة تمامًا، على الرغم من أنه من حيث المبدأ يمكن تفسير ذلك بمدلول النظرية الكهرومغناطيسية للضوء.

وكما أشرنا عند مناقشة إشعاع الفجوة، يمكن اعتبار أن كل ذرة تحتوي على عدد من المتذبذبات الكهربية قادرة على التذبذب بترددات معينة متنوعة، وإذا نشطت بواسطة وسائل تتضمن تحول الطاقة الحرارية أو الطاقة الكهربية إلى طاقة ميكانيكية فإنها ستشع موجات كهرومغناطيسية لها تردد يشير إلى التردد الخاص بالمتذبذبات. ويعبر عدد الألوان المختلفة في طيف أي مادة، في هذا الشرح، عن الأنواع المختلفة للمتذبذبات الموجودة «والمثارة» في الذرة، ويعتمد السطوع النسبي للألوان على عدد المتذبذبات لكل نوع موجود والفاعلية التي تم تنشيطها بها. ولقد أدت دراسة أبسط الأطياف المعروفة، طيف ذرة الهيدروجين، إلى نتيجة أنه حتى بنية ذرة الهيدروجين لا بد أن تكون «معقدة مثل تعقيد بيانو كبير».

بنهاية القرن التاسع عشر وبداية القرن العشرين بدأ عدد من التجارب التي تكشف عن بعض المعلومات حول بنية الذرة. وقد بينت الدراسة أن الذرات تحتوي على شحنات كهربية موجبة وسالبة. وكما أشرنا من قبل، من دراسة الظاهرة الكهروضوئية، أن الشحنات السالبة هي الإلكترونات وأنه من الممكن أن «تنفصل» عن الذرة. واقترح مكتشفها طومسن أن الذرة يمكن اعتبارها كقطعة من بودنج



شكل ٧-٩: نموذج ذرة الهيدروجين لرذرفورد-سمرفيلد. N النواة، e الإلكترون الدائر. وبالرغم من أن المدار يبدو بيضاويًّا بشكل كبير، والنواة ثابتة في مركز الذرة كما بيّن ذلك سمرفيلد والآخرون فإن التأثيرات الأخرى تجعل المدار كلية يعمل (يلف) حول النواة على أنها المركز.

الزبيب، والإلكترونات هي الزبيب المدفون في «القطعة» الكثيفة الكتلة والموجبة الشحنة. ومع ذلك أثبت النيوزيلندي الذي كان يعمل بإنجلترا، إرنست رذرفورد أن الذرة تبدو على الأغلب كحيز فارغ، وتتركز معظم كتلتها في المركز. وبالرغم من ذلك فإن الخواص الكيميائية والخواص الحركية الجزيئية للذرات تظهر أن هذا الحيز الفارغ هو جزء من حجم الذرة.

وعندئذ اقترح رذرفورد النموذج التالي للذرة، الذي هو أساس للوصف الموجود في معظم المناقشات العامة الحالية للبنية الذرية: معظم كتلة الذرة تتركز في حجم صغير جدًّا يسمى النواة، في مركز الذرة. تحمل هذه الأنوية معها شحنة كهربية موجبة. ويوجد خارج النواة عدد من أجزاء صغيرة من المادة، هي الإلكترونات، كل منها يحمل شحنة كهربية سالبة. وهناك عدد كافٍ من الإلكترونات سالبة الشحنة مساوٍ تمامًا للعدد الكلي للشحنة الموجبة داخل النواة. تتحرك الإلكترونات حول النواة في مدارات بيضاوية بنفس الكيفية التي تتحرك بها الكواكب في مداراتها البيضاوية حول الشمس، إلا أن قوى التجاذب المسببة للمدارات البيضاوية هي قوى كهربية بدلًا من جاذبية (راجع الفصل السادس). وبمعنى آخر، الذرة مثل مجموعة شمسية مصغرة. والاختلاف الوحيد بين الأنواع المتنوعة من الذرات هو في مقدار الكتلة وشحنة النواة وعدد الإلكترونات في المدارات. ففي حالة الهيدروجين يوجد إلكترون واحد يدور حول النواة، وفي حالة الهليوم يوجد إلكترونان، والليثيوم ثلاثة إلكترونات وهكذا. ويبين الشكل ٧-٩ نموذج الهيدروجين.

ومع ذلك هناك قصور خطير في نموذج رذرفورد المقترح بالصورة. إنه ليس مستقرًّا. فالإلكترون الدائر هو بالضرورة إلكترون متسارع لأنه يغير اتجاه حركته

باستمرار. لكن وفقًا للنظرية الكهرومغناطيسية،* لا بد للإلكترون المتسارع (أو أي شحنة كهربية متسارعة) أن يشع طاقة للخارج، مما يعني أن الإلكترون في النهاية يجب أن يدور حتى يسقط في النواة.

وقد بينت الحسابات أن ذلك «في النهاية» قد يستغرق حوالي ٠,٠١ من المليون من الثانية، مصحوبًا بومضة من الضوء. لكن هذا لا يحدث. وأكثر من ذلك، أن الطيف المحسوب لومضة الضوء، حتى لو حدث ذلك، لا يمثل الطيف المنبعث بواسطة ذرات الهيدروجين المثارة. ولذلك فنموذج رذرفورد، كما اقترح في الأصل، به عيوب خطيرة.

وبالرغم من المشاكل المرتبطة بنموذج رذرفورد، فإن أدلته التجريبية بأن كل كتلة الذرة مركزة في النواة على الأغلب أمر لا جدال فيه. وأخذ نيلز بور الشاب الدنماركي الذي كان يعمل مع رذرفورد سنة ١٩١٢ على عاتقه، وهو متأثر تأثرًا كبيرًا بأفكار الكم لبلانك وأينشتاين، أن يحوّر نموذج رذرفورد على ضوء تلك الأفكار. ونشر بور نتائجه سنة ١٩١٣. شعر بور أن الذرة لا بد أنها ثابتة، وعليه فلا بد من وجود مدارات إلكترونية محددة حيث لا ينطلق إشعاع، بالرغم من أن ذلك من متطلبات النظرية الكهرومغناطيسية. ولأن الإلكترونات في المدارات المختلفة لها قيم مختلفة من الطاقة الكلية، يُسمح فقط لها بالتواجد في مدارات خاصة ومعينة، تمامًا مثل المتذبذبات في مشكلة إشعاع الجسم الأسود، حيث يسمح فقط لقيم معينة من الطاقة. واقترح بور إذن أن الذرة يمكن أن تغير طاقتها فقط بأن يغير إلكترون موقعه من مدار إلى مدار آخر له طاقة مختلفة. وهكذا قد تنبعث من الذرة كمية من الطاقة — فوتون مثلًا — بأن «يقفز» إلكترون من مدار إلى مدار أقل طاقة. وبالمثل، قد يمتص ضوءًا ذا تردد معين إذا كان فوتون ذلك التردد له الطاقة المساوية تمامًا لفرق الطاقة بين مدار الإلكترون الذي جاء منه والمدار الآخر المسموح شغله، ليستطيع الإلكترون «القفز».

وعن طريق قياسات الطيف التجريبية لذرة الهيدروجين والاستخدام العبقري لفكرة أن أبعاد المدارات عندما تكون كبيرة بما فيه الكفاية، فإن أفكار الكم تعطي

*تكلمنا عن الموجات الكهرومغناطيسية في الفصل السادس على أنها نتجت عن اهتزاز أو ارتجاج الشحنة الكهربية. وإذا نظرنا إلى المدار من الجانب بدلًا من أعلى، فسيبدو وكأن الإلكترون يتذبذب ذهابًا وإيابًا على مسافة مساوية لقطر المدار. والسمة الأساسية لنظرية الحركة الكهرومغناطيسية هي أن سرعة الإلكترون تتغير إما بسبب التغير في السرعة أو التغير في الاتجاه.

نفس نتائج الأفكار الكلاسيكية، استنتج بور الفروض التالية لبنية الذرة:

(١) معظم كتلة الذرة مركزة في النواة ذات الشحنة الموجبة. وتحت تأثير جاذبية القوى الكهربية التي تبذلها النواة، تدور الإلكترونات سالبة الشحنة حول النواة في مدارات معينة مسموح بها وغير مشعة. وللتبسيط تعامل هذه المدارات على أنها دائرية.

(٢) هناك قاعدة معينة تحدد أي مدار معين مسموح به. ولا بد للحركة الزاوية للإلكترون (كمية الحركة الزاوية مشابهة لكمية الحركة الخطية للحركة في خط مستقيم) المستقر في مدار معين، أن ترتبط بثابت بلانك. وبصفة خاصة، لا بد لكمية الحركة الزاوية أن تكون مساوية لعدد صحيح n مضروبًا في الثابت h ومقسومًا على 2π. (في حالة المدار الدائري، كمية الحركة الزاوية هي كتلة الإلكترون m مضروبة في سرعته v ونصف قطر المدار r، أي $mvr = nh/2\pi$، حيث n عدد صحيح ١ أو ٢ أو ٣ أو ٤ ... إلخ.) وعليه تتميز المدارات المختلفة المسموح بها بالرقم n الذي يطلق عليه الرقم الكمي، $h/2\pi$ هو كمية الحركة الزاوية الكمية. ويقال إن كمية الحركة الزاوية قد تم كنتمتها.

(٣) يمكن للذرة أن تمتص أو تشع إشعاعًا على شكل فوتونات فقط مشيرة إلى الفرق في الطاقة بين المدارات المسموح بها. ولا بد أن يرتبط تردد الضوء f الممتص أو المشع بالفرق في الطاقة، E عن طريق علاقة أينشتاين $E = hf$.

استطاع بور أن يحسب الطاقة المتاحة لذرة الهيدروجين وكذلك تردد الضوء المشع في طيف الهيدروجين، باستخدام تلك الفروض والقيم المحسوبة من قبْل لشحنة وكتلة الإلكترون وثابت بلانك h.* ولقد اتفقت قيم حساباته مع القيم المقاسة في حدود ٠,٠١٪. فضلًا عن أنه تنبأ بحتمية وجود بعض أطوال الموجات في الجزء الخاص بالأشعة فوق البنفسجية في الطيف التي لم يتم تقديرها بعد. وتم البحث عنها ووجدت، كما توقع هو. وحسب أيضًا من نظريته حجم ذرة الهيدروجين في

*الواقع أن بور استخدم منهجًا في التفكير أعقد كثيرًا، لكن هذه المسلمات يمكن استنتاجها من أعماله، وتستخدم عادة في عرض نموذج بور. وهناك نقطة أخرى جديرة بالذكر هي أن الطاقات المحسوبة باستخدام نموذج بور تختلف عن الطاقات التي افترضها بلانك في تحليله لمسألة إشعاع الجسم الأسود، وما زال تحليل بلانك صالحًا لأن الإشعاع المنبعث من الجسم الأسود لا علاقة له بتفاصيل النموذج، وكل ما نحتاجه هو أن تتغير طاقات الذرات أو الذبذبات بمقادير متفاوتة. فيما بعد أجرى أينشتاين تحليلًا آخر مفصلًا لمسألة الجسم الأسود قدم فيه مفهوم الانبعاث المستحث للإشعاع، وهو المفهوم الذي يعد أساس عمل الليزر، وجاءت نتائج التحليل المختلف لأينشتاين مطابقة لنتائج بلانك.

حالته المثارة ووجد أنها (أي قطرها) حوالي واحد أنجستروم وهو ما يتفق مع القياسات التجريبية.

وتمامًا مثلما كان الحال مع نظرية نيوتن عن الحركة الكوكبية، أدت الاستفاضة في التفصيل والتنقيح لنظرية بور إلى اتفاق أفضل بين النظرية والقياسات التجريبية. وقدم الفيزيائي الألماني، أرنولد سمرفيلد المدارات البيضاوية والتصحيحات (المطلوبة بواسطة النظرية النسبية) لكتلة الإلكترون بسبب السرعة العالية. واعتبر العالمان الهولنديان صامويل جودشميث Samuel Goudsmit وجورج أولينبك George Uhlenbeck أن الإلكترون نفسه لا بد أنه يدور حول محوره الذي قد يساهم بتأثيرات مغناطيسية لحسابات طاقة الإلكترون. وأكثر من ذلك، فقد جعلت هذه الدراسات بعد عدة سنوات من الممكن تفسير خواص المادة المغناطيسية المختلفة. أدت كل هذه الأفكار إلى التقدم بإضافة أعداد كمية بجانب العدد الكمي n الذي طرحه بور. وتنتمي تلك الأعداد إلى شكل المدار البيضاوي وتوزيع مستوى المدار في الفراغ وكمية الحركة الزاوية لدوران الإلكترون. وهكذا فبالإضافة إلى السماح فقط بمدارات طاقة معينة، من بين كل أشكال المدارات البيضاوية المختلفة المحتملة، سُمح فقط لأشكال معينة من القطع الناقص وتوجهات معينة لمستوى مدار ذي شكل معين. بالإضافة إلى أن دوران الإلكترون تم كنتمته ليصبح له قيمة كمية حركة زاوية مغزلية واحدة تتميز عن كمية الحركة الزاوية المدارية، واحتمالية اتجاهين فقط لتوجه محوره المغزلي.

ومع كل نجاحاتها الظاهرية والطبيعة التطورية لمفاهيمها فلنظرية بور العديد من العيوب الخطيرة. فمن جهة، فروض بور الأساسية اختيارية تمامًا ولم يتم اشتقاقها من نظرية موجودة بالفعل. إلا أنه على الجانب الآخر، استخدم بحرية النظريات الكلاسيكية القائمة. ولم يكن هناك مبرر، فمثلًا، النظرية الكهرومغناطيسية للإشعاع، التي برهنت على أنها تعمل بكفاءة عالية بالنسبة لمدارات من حجم بوصة واحدة والتي استخدمها بور عند الاستدلال على فرضياته، لا تستخدم في حالة مدارات لها حجم أنجستروم واحد. وعلى كل، فاتصالات الراديو، المبنية على نظرية الكهرومغناطيسية، ناجحة تمامًا. بل أكثر من ذلك، تم تقديم أعداد كمية جديدة عند الحاجة، ومرة ثانية دون تبرير مقبول.

كم من أنواع الأعداد الكمية سيصبح وجودها ضروريًا وما هو الوقع أو الأسباب التي تعود إلى ظهورها؟ ففي الواقع إن العدد الكمي لحركة الإلكترون المغزلية ليست

عددًا صحيحًا، بل له القيمة ١ /٢. بالإضافة إلى أن القياسات التفصيلية لعدد معين من السمات الدقيقة للطيف، في نظرية معينة، أدت إلى استنتاج أن أعدادًا كمية أخرى قد لا تكون أعدادًا صحيحة. ولا يتفق ذلك مع الفكرة التي تتضمن أن الأعداد الكمية المتنوعة لا بد أن تكون في حزم كاملة.

وأكثر من ذلك، فقد قابلت محاولات مد تطبيق الحسابات الكمية لتشمل الذرات التي بها أكثر من إلكترون واحد عقبات خطيرة. وفشلت تمامًا، الحسابات بالنسبة لذرة الهليوم ذات الإلكترونيين. وبدا من الضروري إدخال فرضيات معينة وفروض لكل نوع مختلف من الذرات.

هناك كثير من الأسئلة التي لم تقدم لها نظرية بور إجابات أو حتى تلميحات بإجابات. فمثلًا، بالرغم من أنه يمكن بها تقدير الترددات الخاصة في طيف ذرة معينة، لم تقل شيئًا عن مدى سطوع أو شدة الضوء المنبثق عن تلك الترددات وكيف يجب أن يكون. بل في الواقع هناك عدد من الترددات المفروض أن تكون في الطيف وفقًا للنظرية ولكن لم يلاحظ وجودها إطلاقًا. واتضح أنه من الممكن استنباط قواعد معينة، تسمى قواعد الانتقاء، للتنبؤ بالترددات التي يمكن مشاهدتها وتلك التي لا يمكن مشاهدتها: لكن لم تقدم نظرية بور أي تلميحات، جيدة أو سيئة، بالنسبة لوجود مثل هذه القواعد. وفي النهاية، أقر الجميع بأن نظرية بور نظرية غير كاملة أو نظرية مؤقتة.

وبالرغم من كل ذلك، فالقوة الموحدة لمفاهيم بور كبيرة حتى إنه يمكن استخدامها. حتى ولو بطرق كيفية أو شبه كمية في كثير من الأمور والمجالات المختلفة في الفيزياء والكيمياء. وما زال نموذج بور-سمرفيلد-رذرفورد يُدرَّس في المناهج الأولية في المدارس الثانوية والكليات والمناقشات العامة المتعلقة بالبنية الذرية. إنه أفضل توضيح بسيط متاح بالرغم من كل نقاط الضعف.

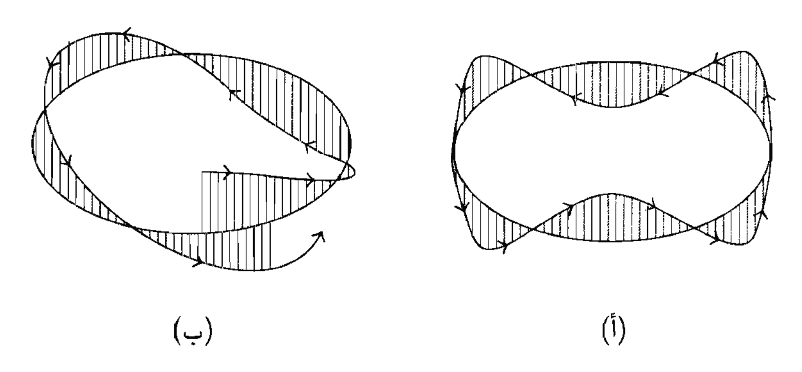
وفي خلال عقد من تطوير بور للنموذج النووي للذرة، اقترح شاب فيزيائي فرنسي، لوي دي برويل Louis de Broglie، جزءًا من رسالة للدكتوراه «تعليلًا» لفروض بور. اقترح دي برويل، وهو مقر بأهمية تكافؤ الطاقة والكتلة الذي اقترحته النظرية النسبية لأينشتاين، أنه حيث إن كلًّا من الكتلة والضوء من أشكال الطاقة فلا بد من إمكانية وصفهما بنفس المدلولات. وهكذا ولأن أينشتاين قد بين في تحليله للتأثير الكهروضوئي أن الضوء يظهر كلًّا من خواص الموجة والجسيمة، وعليه أيضًا، يجب على المادة أن تظهر خواص الموجة والجسيمة. وأكثر من ذلك فإلى جانب

ترافق النظرية النسبية في التماثل والعلاقة الوثيقة بين المكان والزمان هناك أيضًا تماثل وعلاقة وثيقة بين الطاقة وكمية الحركة. ويبين دي برويل أن كمية حركة الفوتون يمكن الحصول عليها بقسمة طاقته على c، سرعة الضوء في الفراغ الخالي. وهكذا فكمية حركة الفوتون هي h مضروبًا في f مقسومًا على c، (hf/c). وعلى كل هناك علاقة في موجات الضوء بين التردد f وطول الموجة t، وتحديدًا $f = c/t$. ولذلك بالجبر البسيط لا بد أن تكون كمية الحركة للفوتون تساوي ثابت بلانك h مقسومًا على طول الموجة $(p = h/t)$، وهي الصيغة المذكورة عند مناقشة التأثير الكهروضوئي في المقطع المتقدم.

لا بد أن تكون هذه العلاقة صالحة للمادة كما هي صالحة للضوء، وبصفة خاصة يجب أن تكون صالحة للإلكترونات في الذرة. اعتقد دي برويل أن طبيعة موجة الإلكترون تحدد كيف تنتقل الإلكترونات من مكان إلى آخر، تمامًا مثل طبيعة موجة الضوء التي تحدد كيف تنتقل الفوتونات من مكان إلى آخر. وبانعكاس العلاقة بين طول الموجة وكمية الحركة استطاع أن يستخدم سرعة الإلكترون (لأن كمية الحركة هي الكتلة مضروبة في السرعة) ليحسب طول موجته.

وعندما حول دي برويل انتباهه إلى السؤال عن أي المدارات يُسمح بها في الذرة، أشار إلى أنه إذا كانت أعداد صحيحة من الموجات يمكن أن تتلاءم بالضبط حول محيط مدار ما، بينما يدور الإلكترون حول ذلك المدار تحت «إرشاد» طبيعة موجية فستقوى الموجة وتستديم نفسها في نسق يسمى نسق الموجة القائم. وعلى كل، إذا لم تتلاءم أعداد صحيحة من أطوال الموجة على مدار في دوائر متتابعة حول المدار فستتواجد الموجات من الدوائر المختلفة في غير مكانها بالنسبة لبعضها البعض وتلغي كلية نسق الموجة. وهكذا لا يمكن لمثل هذا المدار أن يبقى، ويوضح شكل ٧-١٠ هذه الأفكار.

ومن السهولة نسبيًّا حساب سرعة الإلكترون بمدلول نصف قطر المدار r لأي مدار دائري. وتعني شروط الموجة القائمة ببساطة أن $nt = 2tr$، حيث إن $2tr$ هي محيط المدار، n عدد صحيح. وباستخدام العلاقة بين طول الموجة وكمية الحركة استطاع دي برويل أن يستنتج بعملية جبرية بسيطة قاعدة كمية الحركة الزاوية لبور للمدارات المسموح بها (الفرضية الثانية لبور). وبمعنى آخر، السبب في أن مدارات معينة مسموح بها في ذرة ما هو أنه يمكن لطبيعة موجة إلكترون ما أن



شكل ٧-١٠: موجات دي برويل لمدار دائري (أ) موجات مقواه. (ب) موجات لم تقوى أو ملغاة.

ترسي نسق موجة مستقر لهذه المدارات المعينة. ولا تستطيع كل أنساق الموجات للمدارات الأخرى أن تستقر.

من الطبيعي أن وجود التشابه الذكي وحده لا يكفي لإرساء مبدأ علمي. لكن ولحسن الحظ، فبعد عدد قليل من السنوات وجد دليل مستقل تجريبي لطبيعة موجة الإلكترون عن طريق باحثين كانوا يعملون في إنجلترا وألمانيا وأمريكا. (تضمن فريق الباحثين بإنجلترا جي بي طومسن، ابن جي جي طومسون مكتشف الإلكترون في جيل سابق.) وحيث إن الحيود هو أحد الخواص الأساسية للموجات، فقد بين التجريبيون أن الإلكترونات يمكن أن تحيد بنفس الطريقة التي تحيد بها الأشعة السينية. وفي الواقع يمكن عن طريق تجارب الحيود بواسطة البلورات قياس طول الموجة للأشعة السينية وللإلكترونات. وهكذا أصبح من الممكن قياس طول موجة شعاع من الإلكترونات وإظهار أنها مساوية تمام للقيمة المحسوبة من سرعة الشعاع وكتلة الإلكترون وفرضية الموجة لدي برويل.

وكثيرًا ما استعرضنا في القرن التاسع عشر والقرن العشرين أن التقدم في أحد فروع العلوم غالبًا ما يكون له تأثيرات غير متوقعة في فروع أخرى من العلوم ومن الإنجازات البشرية. وأصبحت المقدرة على إجراء تجارب الحيود على الإلكترونات (مع النيوترونات والجسيمات تحت الذرية الأثقل كتلة بحوالي ألف وثمانمائة مرة من وزن الإلكترون) جزءًا قياسيًّا من مخزون معامل العلوم البحتة والتطبيقية في أنحاء العالم. ولقد صمم الميكروسكوب الإلكتروني، الموجود في كثير من مراكز البحوث الطبية والبيولوجية، وفقًا لمبادئ موجة البصريات، ويسمح بدراسة الأشياء الصغيرة جدًّا التي لا يمكن رؤيتها بالميكروسكوب العادي.

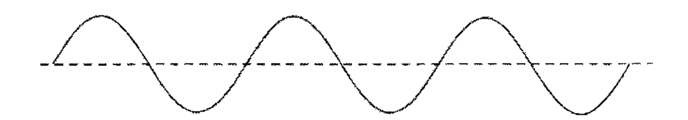
وفرضية موجة دي برويل، في شكلها البسيط، لها استخدامات محدودة للفهم التفصيلي لبنية الذرة، لكن سرعان ما توسعت ونقحت لتعطي نظرية جديدة لحالة المادة كاملة وشاملة وقوية، وقادرة على حل المشاكل ومجيبة على الأسئلة التي لم تستطع نظرية بور التعامل معها. بل أكثر من ذلك، امتدت تشعبات وتضمينات هذه النظرية الجديدة إلى كل فروع العلوم تقريبًا وتلك الفروع من الفلسفة التي تتناول المعرفة المادية. وسنناقش أكثر بعض من هذه التشعبات.

نظرية الكم وعدم التيقن والاحتمالية

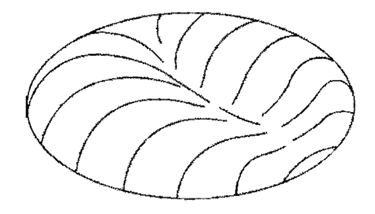
كانت نظرة دي برويل الثاقبة هي أن المادة، التي هي شكل من أشكال الطاقة مثل الضوء، يجب أن تكون قابلة للوصف بمدلولات انتشار الموجات وأيضًا بمدلولات جسيمات تتحرك تحت تأثير قوى متنوعة. وبنفس الطريقة التي رأى فيها أينشتاين موجات الضوء على أنها تحدد كيف للفوتونات أن تنتقل من مكان إلى آخر، فلا بد لموجات المادة أن تحدد للجسيمات، وبصفة خاصة الإلكترونات، كيف تنتقل من مكان إلى آخر. وهكذا بدلًا من استخدام قوانين نيوتن للحركة (أو المبادئ الأخرى المبنية على قوانين نيوتن) لحساب حركة الجسيمات، من الضروري استخدام بعض القوانين أو المعادلات الأخرى لتحديد كيف للموجات أن تنتشر من مكان إلى آخر.

وفي سنة ١٩٢٦ نشر الفيزيائي الرياضي النمساوي أروين شرودنجر نظرية عامة عن انتشار موجات المادة. (كانت هذه النظرية نتاج محاضرة طلب منه أن يلقيها حول فرضية موجة دي برويل.) تناولت نظرية شرودنجر انتشار الموجات في ثلاثة أبعاد، بينما كانت نظرية دي برويل نظرية بعد واحد في الأساس (اعتبرت الموجات تتحرك حول محيط المدار فقط وليس قطريًّا أو عموديًّا على مستوى المدار). والموجات أحادية البعد يمكن تصورها بسهولة: فالموجات عبر أوتار الكمان أو الجيتار أو البيانو على طول الوتر (شكل ٧-١١)، تنتقل موجات صوت الأرغن أو البوق بطول المزمار (ولا يعتبر المرء أن الموجات تنتقل بعرض المزمار أو البوق). وعلى الجانب الآخر فالموجات على سطح الطبلة ذات بعدين (مستعرضة أيضًا)* كما هو

*توصف الموجات بأنها مستعرضة أو طولية ويعتمد ذلك على ما إذا كان اتجاه الاضطراب الاهتزازي عموديًّا (مستعرضًا) على اتجاه انتشار الموجات أم موازيًا (طوليًّا) لاتجاه انتشار الموجات. والموجات داخل عمق السائل أو الغاز تكون طولية، والموجات في الجوامد يمكن أن تكون مستعرضة أو طولية أو خليطًا من كليهما. والموجات على غشاء الطبلة تكون مستعرضة مثل الموجات على الوتر. وموجات الضوء مستعرضة، وموجات الصوت في الهواء طولية. راجع الفصل السادس لمناقشة موجزة عن موجات الضوء.



شكل ٧-١١: موجات ذات بعد واحد.



شكل ٧-١٢: موجات ذات بعدين.

موضح بالشكل ٧-١٢. وبالمثل، فالموجات التي يكونها إلقاء الحصى في الماء تكون ذات بعدين (كما يظهر بالموجات في الشكل ٦-٥). وطبيعي أن موجات الصوت التي نسمعها في حفلات الموسيقى هي ثلاثية الأبعاد.

تتوافق موجات المادة عن طريق الطبيعة الأم بنفس الطريقة التي تتوافق بها الموجات بالآلات الموسيقية أو قاعات الموسيقى عن طريق مصمميها. ويحدد طول الوتر وقطر الطبلة وطول مزمار الأرغن والمواقع المختلفة للفتحات على آلات النفخ الموسيقية وعلى أوتار الآلات وأبعاد قاعات الموسيقى، تحدد كلها طول موجة الصوت الرنان الأساسي المعين لكل نظام. وكل هذه الأبعاد متضمنة في ظروف حدودية، يمكن تحديدها رياضيًّا. بالإضافة إلى أن سرعة الانتشار (السرعة التي تنتقل بها الموجة) هي التي تحدد الترددات التي ستكوّن الصوت الرنان للظروف الحدودية المعينة. فعازف الكمان أو موفق البيانو (ضابط نغمات البيانو) يتحكم في السرعة بضبط التوتر على الوتر، وبذلك يحدد تردد الصوت الرنان. (وينوِّع عازف الكمان أيضًا الظروف الحدودية بواسطة «تحريك» أصابعه على الأوتار.)

تكون الظروف الحدودية في حالة موجات المادة (ولنقل مثلًا إلكترون) مقيدة بالبنية التي يجد فيها الإلكترون نفسه. فمثلًا بيئة الإلكترون في الذرة تختلف عن بيئة الإلكترون المتنقل على طول أنبوبة الصورة في التليفزيون. ففي الذرة تكون الظروف الحدودية ثلاثة أبعاد، بينما في أنبوبة الصورة هي ذات بعد واحد. وأكثر من ذلك، فإن سرعة موجة المادة للإلكترون تتحدد عن طريق طاقة الوضع، وعليه فإن سرعة الإلكترون مقيدة بواسطة تجاذب الإلكترونات في النواة والتنافر الإلكتروني

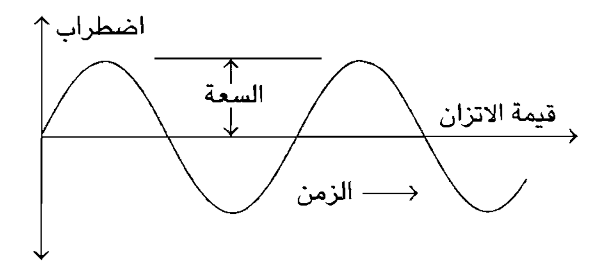
لكل الإلكترونات الأخرى في الذرة. وتقدر طاقة الوضع في أنبوبة صورة التليفزيون بواسطة الجهد الكهربي المستخدم للأنبوبة. ولذلك ستكون موجات المادة التي تصف الإلكترون مختلفة في الذرة عن تلك في حالة أنبوبة صورة التليفزيون. (ويقابل هذا حقيقة أنه في نموذج بور، ينتقل الإلكترون في مدار مساره مختلف جدًّا عن الانتقال في أنبوبة صورة التليفزيون — صور مختلفة للقوى التي تؤثر على الإلكترون.)

ولكل نوع معين من ظواهر الموجة (الأوتار المتذبذبة، وغشاء الطبلة المتذبذبة، وموجات الصوت وموجات الماء وموجات الضوء وموجات المادة ... إلخ) وبالرغم من التنوعات المحتملة في الظروف الحدودية وسرعة الانتشار، هناك معادلة معينة مقيدة تسمح بحساب اضطراب الموجة عند أي نقطة وأي زمن. تسمى هذه المعادلة بمعادلة الموجة. ولمعادلة الموجة شكل رياضي مختلف إلى حد ما للأنواع المختلفة من ظواهر الموجات، أي أن الشكل الرياضي للموجات على أوتار يختلف عن الشكل الرياضي لمعادلات موجات الصوت في وسط ذي ثلاثة أبعاد، الذي بدوره يختلف في الشكل بمعادلة لموجات الضوء الكهرومغناطيسي وهكذا.

ولقد طور شرودنجر صيغة معينة لمعادلة موجة خاصة بموجات المادة، وتسمى هذه المعادلة بمعادلة الموجة لشرودنجر. وتعمل معادلة الموجة لشرودنجر ما عملته قوانين نيوتن للحركة بالنسبة للجسيمات عند تحركها. وللأسف، ليس من الممكن رسم أمثلة قليلة بسيطة من المنحنيات لتبين الطبيعة الأساسية لمعادلة شرودنجر. وأحد الأسباب أن معادلة شرودنجر وحلولها تتضمن عادة استخدام أرقام معقدة.* وعليه فإن الحلول التي تصف موجات المادة ليس من الممكن إظهارها بسهولة أو تمثيلها بأنواع من الأشكال أو الصور المستخدمة للموجات الأخرى. وطبيعي، أن الحلول مشروحة بصيغ رياضية مناسبة.

والحل الدقيق لمعادلة الموجة لشرودنجر يتحدد، كما أشرنا من قبل عن طريق علاقات الظروف الحدودية وطاقة الوضع للموقف المعين. هذه الحلول، إذن، هي موجات قائمة ثلاثية الأبعاد. وتميز موجات الإلكترونات القائمة ثلاثية الأبعاد تلك مواقع الإلكترونات في الذرة، وهكذا فهي تحل محل «المدارات» في نظرية بور، حتى

*عادة ما تحتوي الأعداد المعقدة على الجذر التربيعي لرقم −١ ولدى بعض الخصائص لمتجهات البعدين، تصبح مناقشة الأعداد المعقدة وأهميتها من الضخامة مما يجعله استطرادًا بعيدًا عن الهدف الرئيسي لهذه المقدمة لفيزياء الكم. ويكفي أن نقول إنها مفيدة للغاية للوصف الرياضي الصحيح لعديد من الظواهر.



شكل ٧-١٣: خصائص الموجات.

إنه في الاستخدام العادي تسمى مدارات، حتى بالرغم من أنها مفهوميًّا تختلف تمامًا عن مدارات نظرية بور. ويستعمل اصطلاح آخر بدلًا من مدارات هو الأغلفة (Shells)، فنقول إن الإلكترونات موجودة في أغلفة حول النواة. وحتى هذه الأغلفة لا تتمايز هندسيًّا، فهي تتشابك وتتداخل فيما بينها بشكل ما. وكوصف أكثر تمثيلًا يمكن القول إن الإلكترونات في الذرة موجودة في «سحب» حول النواة.

وقبل مناقشة نتائج استخدام نظرية شرودنجر في فيزياء الذرة، من الضروري أن نعرف بعض المفاهيم الأساسية المتضمنة في حركة الموجة. فالمفاهيم الأساسية بالنسبة لحركة جسيمة، هي الموقع والسرعة والتسارع والكتلة والطاقة وهكذا. إلا أنه بالنسبة لحركة الموجة، فإن بعض المفاهيم الأساسية هي السعة والطور وسرعة الانتشار والتداخل (راجع شكل ٧-١٣). فإذا تصورنا موجة على أنها اضطراب (نبضات) توسع أو انتشار في وسط ما، أو اضطراب مجال كهرومغناطيسي، فسعة الموجات هي الاضطراب الأقصى (عند أي نقطة في الفراغ) من قيمتها عند الاتزان أثناء تقدم الموجة. يزداد الاضطراب، عند هذه النقطة في الفراغ من صفر إلى القيمة العظمى (السعة) في اتجاه معين، وينقص إلى صفر مرة ثانية، وتعكس اتجاهها ويزداد الاضطراب إلى القيمة العظمى، ثم ينقص ثانية إلى الصفر، وينعكس ثانية إلى الاتجاه الأصلي، ويزداد إلى القيمة العظمى، وهكذا إذا كانت الموجة مستقرة في ثباتها وحلقة الاضطراب متكررة العلو والانخفاض. وربما يكون الاضطراب، في أي لحظة، في الطور الأقصى أو الطور الأدنى أو فيما بين الاثنين.

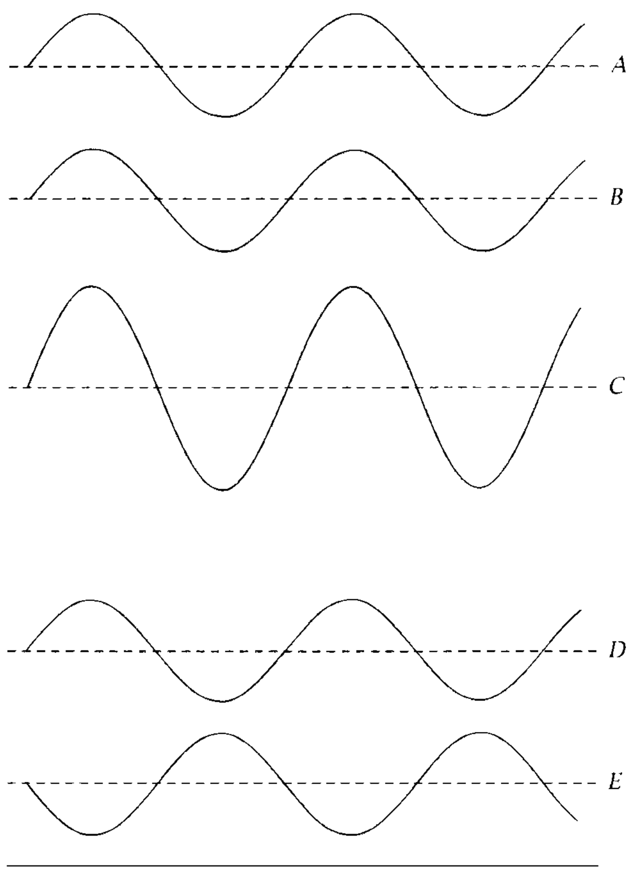
ويعود طور الموجة إلى أي جزء من الاضطراب يحدث عند نقطة معينة في المكان عند لحظة معينة من الزمان. وسيحدث الاضطراب أيضًا في مواقع أخرى من المكان خلال حلقة ما، لكن ليس بالضرورة عند نفس الزمان مثل الموقع الأول.

وفي الواقع، تتأثر كل النقاط المتنوعة في المكان بعمل الموجة مثل عمل المتذبذبات المتناغمة البسيطة التي تم شرحها من قبل، ولكن عند أي لحظة من الزمان، وعند نقاط متعاقبة مختلفة على طول الموجة تتغير أطوار المتذبذبات من اضطراب القيمة إلى النهاية القصوى في اتجاه معين، ثم تعود إلى الصفر، ونهاية عظمى في الاتجاه المضاد وثانية إلى الصفر، وهكذا. وبمرور الزمن تتغير الأطوار بمسلك تقدمي في اتجاه الانتشار، ويطلق على السرعة التي يتقدم بها التغير سرعة الانتشار.

ويوجد في بعض الأحيان في وسط ما أكثر من موجة اضطراب في نفس الوقت، وينتج عن ذلك اضطراب كلي قد يكون كبيرًا جدًّا ويعتمد ذلك على الظروف. فإذا كانت الظروف مواتية، فستضاف الاضطرابات التي تسببها الموجات المنفردة بعضها إلى بعض عند تواجدها. وإذا كانت الاضطرابات لها نفس طول الموجة والتردد تحدث ظاهرة مثيرة تدعى التداخل. ويكون الاضطراب الناتج موجة لها نفس طول الموجة والتردد، الذي يعتمد في سعته وطوره على السعة والطور النسبيين للموجات المنفردة (شكل ٧-١٤). فإذا كانت الموجات المنفردة لها نفس الطور عند نقطة معينة وعند لحظة معينة من الزمن، فالموجة الناتجة ستكون لها سعة مساوية لمجموع سعات الموجات المنفردة، وهكذا ستكون كبيرة جدًّا. ويطلق على ذلك التداخل البناء.

ومن جهة أخرى من المحتمل أيضًا أن يكون للموجات المنفردة عند أي نقطة معينة العلاقة الآتية في الأطوار: فمثلًا عندما تكون موجة اضطراب عند سعتها القصوى في اتجاه معين وموجة أخرى عند سعتها القصوى في اتجاه معاكس، ستكون النتيجة أن تلغي الموجتان كلٌّ منهما الأخرى تمامًا، وتكون المحصلة لا اضطراب على الإطلاق، وكأن لم تكن هناك موجة. وتسمى هذه الحالة التداخل الهدام. هاتان هما الحالتان النقيضتان، وهناك درجات متنوعة من حالات التداخل البناء والهدام بين النقيضين. وتبين الأشكال ٧-١٣ و٧-١٤ تلك الكميات والمفاهيم للموجات متضمنة أعدادًا حقيقية، وتتشابه الأفكار بالنسبة للأعداد المركبة المتضمنة في موجات الحالة، لكنها ليست بالسهولة التي يمكننا تصورها. وتستخدم تأثيرات التداخل لتفسير ظهور الألوان لفقاعات الصابون وطبقات الزيت على الماء من جهة، ومن جهة أخرى في عمليات جهاز التداخل لمايكلسون.

وتعتمد الطاقة التي تنتقل بواسطة اضطراب الموجة على سعة الموجة. ولا يتناسب معدل انتقال الطاقة عن طريق الموجة مباشرة مع سعة الموجة ولكن مع مربع السعة. وهذا صحيح بالنسبة لموجات الضوء وموجات الصوت.



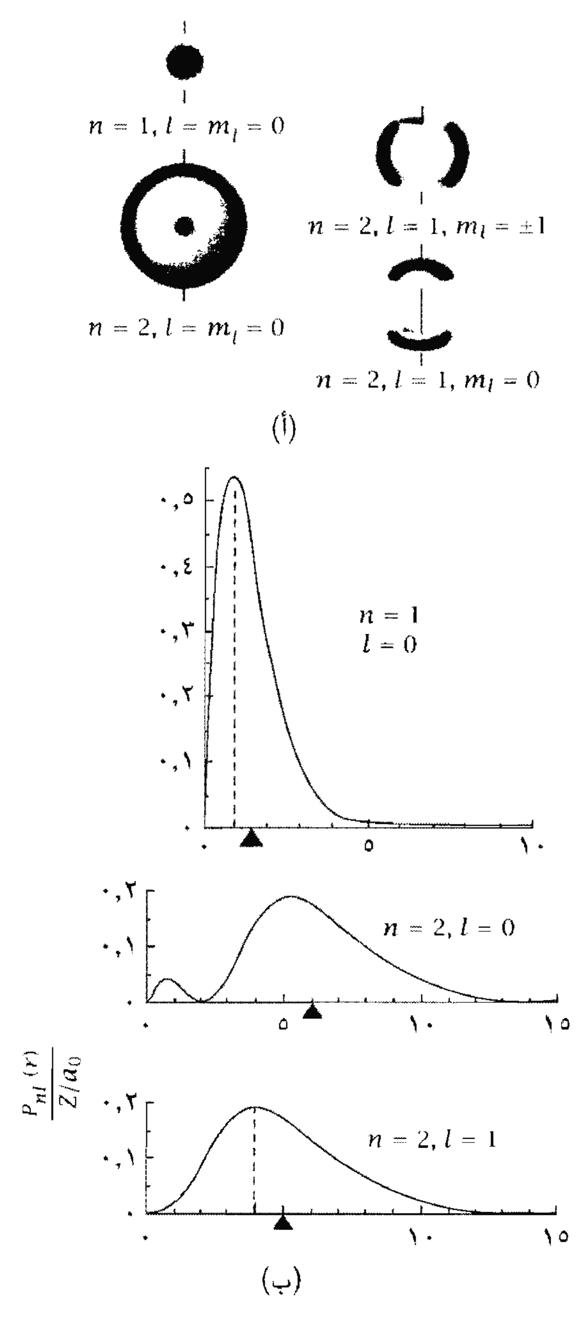
شكل ٧-١٤: تداخل الموجات. الموجة A والموجة B تداخل بناء يعطي الموجة C. الموجة D والموجة E تداخل هدام لا يعطي موجة على الإطلاق.

وتثير عودتنا الآن إلى موجات شرودنجر (موجات المادة) عددًا من الأسئلة: هل تنقل الموجة طاقة (وفقًا للنظرية النسبية فإن المادة هي شكل من أشكال الطاقة)؟ ما هو الوسط الذي يحمل الموجة، أو بعبارة أخرى ما الذي يتموج؟ أي نوع من الموجات موجة شرودنجر؟ الجواب هو (وهذا فرض للنظرية) أن موجة شرودنجر هي موجة احتمال! «تحمل» الموجة احتمال وجود الإلكترون (مثلًا) عند النقطة المعينة في الفراغ. (تقدم بهذا التفسير لموجة شرودنجر لأول مرة الفيزيائي الألماني ماكس بورن Max Born. وقد اعتقد شرودنجر أن الإلكترون في الذرة سينتشر بشكل ما فوق الموجة.) وبالتشابه مع الموجات الكهرومغناطيسية، تم افتراض أن هذه الاحتمالية تتناسب مع «مربع معامل» السعة لموجة الاحتمال. (من الضروري أن نقول «مربع معامل» السعة بدلًا من مجرد مربع السعة؛ لأن موجة شرودنجر تتضمن أعدادًا

مركبة، والمعامل هو تمييز خاص للعدد المركب والمشابه لمقدار كمية المتجه.) وحتى بالرغم من أن الموجة نفسها قد يكون لها سعة مركبة، فالاحتمالية المحسوبة من سعة موجة شرودنجر هي عدد «حقيقي» (عادي)، ولذلك من الممكن رسم شكل للاحتمالات المحسوبة من موجات شرودنجر لحالات معينة.

وباستخدام شرودنجر لمعادلة الموجة الخاصة به في حالة ذرة الهيدروجين، مع طاقة الوضع والظروف الحدودية المناسبة، استطاع شرودنجر أن يبين أن الحلول المقبولة لمعادلته للموجة ممكنة فقط لقيم من الطاقة متميزة. ويشبه ذلك فكرة دي برويل بأن موجات معينة فقط تتلاءم مع المدارات المسموح بها. هذه القيم المتميزة للطاقة مساوية تمامًا للقيم المحسوبة في السابق بواسطة نيلز بور. ويمكن حساب موجات الاحتمال بالتفصيل، وهكذا نحصل على الاحتمالات الفعلية لوجود الإلكترون عندما يكون لديه قيمة معينة للطاقة. والنتيجة هي أنه عند طاقة ما يكون المدار الإلكتروني المصاحب ليس له الشكل الدائري الواضح أو القطع الناقص، لكنه عبارة عن «سحابة» «لكثافة احتمالية» تمتد على منطقة من الفراغ ذات حجم معقول (شكل ٧-١٥). وحيثما كانت السحابة أكثر كثافة فاحتمال وجود الإلكترون يكون أكثر، وفي المناطق ذات الكثافة الأقل تكون فرصة وجود الإلكترون أقل كثيرًا. وكما يبدو فإن السحابة تكون دائمًا كثيفة بشكل معقول على بعد من النواة مساوٍ لنصف القطر المحسوب من نظرية بور. ويجب أن نتوقع ذلك لأن نظرية بور تصلح تمامًا بالنسبة لذرة الهيدروجين. وما هو مختلف تمامًا عن نظرية بور هو مدى السحابة. فمثلًا، هناك احتمال ضئيل أن يوجد الإلكترون قريبًا جدًّا من النواة. والأكثر دهشة هو أن هناك احتمال صغير جدًّا — أقل كثيرًا من فرصة واحد لكل بليون سنة — أن يتواجد الإلكترون على مسافة ميل من النواة، لكنه احتمال، من حيث المبدأ، ورياضيًّا ليس بصفر، حتى بالرغم من كل الأغراض العملية فهو في الأساس صفر. وعلاوة على ذلك، كما يتضح من الشكل ٧-١٥، فالسحب المرتبطة بمستويات الطاقة الممكنة المتنوعة غالبًا ما يكون لها أكثر من منطقة حيث احتمال تواجدها أكبر مقارنة بالمناطق الملاصقة تمامًا للنواة.

وتمكن صورة شرودنجر أيضًا من حل مشكلة استقرار المدارات، التي كان على بور أن يتناولها عن طريق أول افتراضاته الخاصة. وباستخدام موجة الاحتمال، من الممكن حساب احتمال إيجاد شحنة كهربية متأرجحة أو متسارعة في الذرة عندما يكون الإلكترون في مستوى طاقة معين. ونتيجة الحساب هي أن هناك صفرًا هو



شكل ٧-١٥: الكثافة المحتملة لذرة الهيدروجين. (أ) الأبعاد الثلاثة. كل شكل يمثل مدارًا مختلفًا له قيم مختلفة للأعداد الكمية المتنوعة. (ب) منحنى الكثافة المحتملة الكلية عند نصف قطر معين لنفس «المدار» الموجود أعلاه. تبين الخطوط المتقطعة أنصاف الأقطار المعبرة عن مدارات بور. (تم إعادة نسخها بإذن من روبرت أيسبيرج وروبرت ريسنيك، Quantum Physics, New York, John Wiley & Sons 1974.)

محصلة الشحنة الكهربية المتذبذبة وعليه صفر لإشعاع الطاقة الكهرومغناطيسية. وهكذا فالمدار ثابت من ناحية الطاقة.

من الممكن أيضًا أن نفهم كيف يمكن للإشعاع أن ينطلق عندما يغير إلكترون موقعه من مدار ذي طاقة أعلى إلى مدار ذي طاقة أقل. وأثناء الوقت الذي يتغير الإلكترون فيه من حالة طاقة أعلى إلى حالة طاقة أقل، يمكن القول إنه متواجد في حالتي الطاقة في نفس الوقت، أي أن موجات الاحتمال المرتبطة بالحالتين تكون نشطة وتتداخل مع بعضها البعض. وعند حساب احتمالية وجود شحنة كهربية متذبذبة تحت هذه الظروف نجد أن التردد يعبر عن الفرق بين الترددين للموجتين اللحظيتين بقيمة أكبر من الصفر. هذا التردد يساوي تمامًا التردد الذي يمكن حسابه من الفرض الثالث الخاص لبور. وتعبر الحسابات ببساطة عن فكرة أن تردد كل موجة الذي يعبر عن حالتي الطاقة «تتصارعان» كل منهما مع الأخرى. وتسمح الرياضيات أيضًا بحساب القوة أو الشدة (في الواقع، السعة) للتذبذبات الكهربية.* وهكذا فإن النظرية قادرة على تقدير مقدار سطوع الخطوط الطيفية المنبعثة. وعلاوة على ذلك، فإنها تفسر قواعد الانتقاء المختلفة التي وجد أنها تتحكم في حدوث الانتقال بين مستويات طاقة معينة وتسهم بتردداتها في الطيف المشاهد. وذلك ببساطة أبعد من أي شيء يمكن لنظرية بور أن تقدمه.

الأعداد الكمية المتنوعة التي أدخلت على أساس اعتباطي في النظرية القديمة نشأت طبيعيًّا من المتطلبات المتنوعة التي فرضت على الظروف الحدودية والتماثل الهندسي المتأصل في المشكلة. وهناك ثلاثة أعداد كمية مرتبطة بثلاثة أبعاد للمكان في النظرية البسيطة لشرودنجر. (وعدد كمي رابع يرتبط عادة مع الدوران المغزلي للإلكترون، ليس متأصلًا في النظرية، كما سيتم شرحه لاحقًا). تمثل الأعداد الكمية كميات معينة يتم الحفاظ عليها في مشكلة معينة وكنتمتها، وهي ثابتة لكن قد يكون لها قيم متميزة وليست قيمًا ذات مدى مستمر. وأكثر من ذلك، أن الأعداد

*ظاهرة «التصارع» بين موجات مختلفة التردد يمكن استعراضها بشكل بسيط وبسهولة بإحداث أصوات لشوكتين رنانتين لهما تردد مختلف بمقدار قليل جدًّا في نفس اللحظة. وسيتأرجح الصوت الناتج في الارتفاع بتنازع في التردد مساويًا للفرق بين التردد في الشوكتين الرنانتين. وتلاحظ تأثيرًا مماثلًا في حالة مذياع لم يُضبط فيه المؤشر تمامًا. ويحدث أن يستقبل محطتين لهما ترددان مختلفان بقدر قليل في نفس اللحظة، تسمع عندئذ صفيرًا عاليًا مزعجًا، وتردد الصفارة في هذه الحالة هو الفرق بين تردد المحطتين. يستخدم نفس المبدأ لضبط أغلب أجهزة الراديو والتليفزيون حيث يسمى المغايرة .heterodyning

الكمية، بالرغم من أنها أعداد صحيحة، فهي لا تمثل عددًا من الحزم أو وحدات لكميات محفوظة، بل تستخدم لحساب قيم متميزة لكميات محفوظة. وفي حالة ذرة الهيدروجين البسيطة، تكون هذه الكميات هي الطاقة الكلية للذرة، ومقدار كمية الحركة الزاوية، ومكون واحد للمتجه الذي يمثل كمية الحركة الزاوية.* من الممكن أن نبين أنه بخصوص الموجات ذات الأعداد الكمية الكبيرة، تبدأ المناطق ذات الاحتمال الكبير في الظهور مثل المدارات بالمفهوم الكلاسيكي بشكل متزايد. ويوضح ذلك فكرة أن فيزياء الكم تعطي في الأساس نفس النتائج التي تعطيها الفيزياء الكلاسيكية في المنطقة التي ثبت فيها أن الفيزياء الكلاسيكية صالحة، كما ناقشنا ذلك في بداية هذا الفصل.

وبالرغم من أن التأثيرات المغناطيسية على الطاقة بسبب الإلكترون الذي يقوم بالحركة المغزلية ليست أصلية في النظرية الميكانيكية لموجة شرودنجر التي صيغت في البداية، فإنه من الممكن تطعيم تلك النظرية بتصحيحات. وهكذا تم إجراء الحسابات المنقحة التي كان من المتعذر إجراؤها بواسطة نظرية بور وتفصيلاتها التي قام بها سمرفيلد وآخرون. وعلاوة على ذلك فقد طورت التقنيات الرياضية لاستخدام نظرية شرودنجر لكل الذرات للحصول على توافق كمي ممتاز مع التجربة. كانت تلك منطقة لاقت فيها الحسابات المبنية على نموذج بور فشلًا ذريعًا. (وحديثًا تبين كيف يمكن استخدام نظرية بور لبعض من هذه الحالات، وعلى كل، لقد تم ذلك فقط بعد أن أظهرت نظرية شرودنجر كيف يجب أن يكون الحل الصحيح.)

وبالرغم من أن نظرية شرودنجر قوية ومفيدة، لكن بها قصور معين، فإنه على خلاف نظرية بور، من الممكن الالتفاف حول هذا القصور. وكان القصور الرئيسي، من وجهة النظر الأساسية والمفاهيمية، أن معادلة موجة شرودنجر لا تتمشى مع المتطلبات التي وضعتها النظرية النسبية، وهي أن المعادلة هي نفسها لكل المشاهدين. ولقد انتهت محاولات تطوير نظرية شرودنجر لتتمشى مع هذه المتطلبات بنجاح محدود. وفي الواقع، إنه لهذا السبب لا تتعامل نظرية شرودنجر نفسها بكفاءة مع الإلكترون الدوار مغزليًّا والتأثيرات المغناطيسية المرتبطة به. وليس هناك أساس في نظرية شرودنجر لتقدير دوران الإلكترون المغزلي والعدد الكمي المرتبط به.

*كمية الحركة الزاوية، مثل كمية الحركة الخطية العادية، هي كمية متجهة. كما يمكن أن يستدل على ذلك من الشكل ٣-٧ ومن مناقشة المتجهات في الفصل الثالث ويمكن اعتبار أي متجه ثلاثي الأبعاد مجموعة من المتجهات المتعامدة الثلاثة التي تسمى مكونات المتجه الأصلي.

وفي خلال سنوات قليلة من أبحاث شرودنجر، نشر الفيزيائي الرياضي الإنجليزي بي إيه إم ديراك P. A. M. Dirac نظرية جديدة، أطلق عليها نظرية الكم النسبية، التي تضمنت متطلبات نظرية النسبية منذ البداية. ولا تتضمن هذه النظرية أي موجات، وبالفعل، ليس هناك أي كميات متضمنة لكي تسمح برسم صورة أو نموذج بسيط للذرة. ففي هذه النظرية، تبدو فكرة دوران الإلكترون المغزلي (التأثيرات المغناطيسية التي تعود تصويريًّا إلى حركة دوران الإلكترون المغزلية) وكأنها تتابعات لمتطلبات النسبية، تمامًا كما أن التأثيرات المغناطيسية عمومًا يمكن أن تعزى إلى الحركة النسبية للشحنة الكهربية. لقد سلمت نظرية ديراك بكل الأعداد الكمية في نظرية شرودنجر بالإضافة إلى نصف عدد كمي صحيح مرتبط بحركة الإلكترون المغزلية. وأصبح واضحًا تمامًا السبب في وجود أربعة أعداد كمية مصاحبة للإلكترون: فالظروف الحدودية والتماثل الرياضي لا بد أن ترتبط بأربعة أبعاد من الزمكان. وتنبأت نظرية ديراك أيضًا أنه بجانب وجود الإلكترونات سالبة الشحنة، لا بد أيضًا من وجود جسيمة ذات شحنة موجبة لها نفس الكتلة مثل الإلكترون. وتسمى هذه الجسيمة الآن البوزيترون، وتم اكتشافه بعد أربع سنوات من تنبؤ ديراك بوجوده.

ونظرية ديراك ليست مريحة في استخدامها، ويمكن استخدام نظرية شرودنجر لمعظم الأغراض حيث يمكن تحويرها لتسمح بالتأثيرات الناتجة من الدوران المغزلي للإلكترون. وهكذا فإن نظرية شرودنجر مفيدة جدًّا في حل المشكلات في كل ما يخص الفيزياء الذرية والجزيئية والحالة الجامدة.

وأحد الأمور الهامة لموجة الاحتمال هي أننا لا نستطيع التحدث عن وجود أي إلكترون في نقطة معينة من المكان لأننا لا نستطيع تحديد موقع أي موجة عند نقطة معينة من المكان. فالموجة تنتشر بالضرورة، وهكذا فاحتمال إيجاد إلكترون عند نقطة محددة هو أيضًا منتشر. تستطيع القول بأن الإلكترون «غير واضح المعالم». ولهذه الفكرة بعض التضمينات المثيرة، فإدخال فكرة موجات الاحتمال تؤدي إلى عدد من تلك التضمينات المثيرة. وإدخال الاحتمالية في مناقشة موقف فيزيائي يعني أن هناك شيئًا من عدم التيقن. وحتى ولو كان احتمال حدوث شيء ما كبيرًا جدًّا، فبالضرورة، ومن التعريف، هناك القليل من عدم التيقن. وعندما يقال عن شيء ما إنه محتمل أو غير مؤكد، فكثيرًا ما يكون ذلك بسبب عدم توفر الوقت الكافي أو الأجهزة الجيدة لعمل القياسات بكل دقة. إلا أنه، في فيزياء الكم، يعتقد أن عدم التيقن متأصل في طبيعة الأشياء ولا يمكن إغفاله مهما كانت دقة الأجهزة المستخدمة.

ولعرض المقولة ببساطة، فهي تعني أنه إذا كانت التنبؤات مبنية على أحداث سابقة ونظرية كاملة ومفهومة جيدًا فربما تكون النتائج هنا غير مؤكدة. وهكذا فالاتصال المباشر والصارم بين الدافع والتأثير قد تم هدمه، لأنه ليس من المؤكد أن الدافع سيؤدي إلى التأثير المضبوط.

ولنرى كيف يحدث ذلك، من الضروري أن نناقش ما هو المطلوب تضمينه لإجراء أو لتحديد قياسات دقيقة. افترض لسبب ما كان من الضروري قياس قطر جسم مستدير مثل كرة السلة. وافترض كذلك أن سطح الكرة أملس ومستدير تمامًا حتى إنه لا داعي للقلق حول وجود أي شيء غير منتظم على سطح الكرة. توضع الكرة بجانب عصا القياس، ويحاول الشخص الذي يجري القياس أن ينظر عموديًّا على عصا القياس ليرى بالضبط أين يقع مسقط الأطراف القصوى للكرة على المقياس. وإذا كانت عين الشخص سليمة لمثل هذا الشيء فقد تكون نتيجة القياس ١٢,٥ بوصة. السؤال الوارد هنا: هل هي ١٢,٥ بوصة بالضبط؟ أم يمكن أن تكون ١٢,٤٩٩ بوصة أو ربما ١٢,٥٠١ بوصة؟

وإذا كانت المشكلة السابقة مهمة بما فيه الكفاية فقد يلجأ الشخص إلى إجراء القياسات مستخدمًا الميكرومتر الميكانيكي الكبير، مثبتًا فكي الميكرومتر «ليلمس» الكرة إلى أن يصبح فكا الميكرومتر يلامسان الكرة بالكاد (ولكن لا يضغطا عليها)، ويحدد أن قطر الكرة هو ١٢,٥٠٠ بوصة. ومرة أخرى يثار السؤال: هل يحتمل أن يكون القطر ١٢,٤٩٩٩ أو ١٢,٥٠٠١؟ وعندئذ قد يحدد الشخص الذي قام بإجراء التجربة أن دقة فكي الميكرومتر في أفضل حالته ٠,٠٠٠١ وعليه فإن السؤال الأخير لم يتم الإجابة عليه بالجهاز المتاح. فنسبة خطأ القياس يمكن أن تكون ٠,٠٠٠١ بوصة. وربما تكون ٠,٠٠٠٠١ بوصة فقط، لكن لا يمكن برهنة هذا سواء بالآلة أو بإحساس اللمس. فعندما يحاول الشخص ضبط الآلة لتلامس الكرة بالضبط، قد يضغط عليها دون قصد بحوالي ٠,٠٠١ بوصة، وبصفة خاصة إذا كانت الكرة لينة.

يمكن التوصل إلى نتيجتين من المناقشة السابقة. إحداهما على الأقل في المجال الفيزيائي، ليس من الممكن معرفة شيء مثل قطر الكرة ما لم نستطع قياسه. أو بمعنى آخر، يجب أن تبنى المعرفة على المشاهدة التجريبية أو القياسات. وهذه المقولة هي لب المدرسة الفلسفية التي تدعى الوضعية المنطقية. والنتيجة الأخرى هي أن محاولة قياس شيء أو موقف قد يقلق أو يشوه الشيء المراد قياسه. (ففي حالة الكرة اللينة، كان التشوه حوالي ٠,٠٠٠١ بوصة فقط، لكن ذلك قد يضع حدًّا

للدقة التي نقيس بها قطر الكرة، وبالطبع حدًا على الدقة التي يمكن بها معرفة القطر على الإطلاق.)

ومحاولة قياس شيء ما قد يتشوه أثناء قياسه ليس بأمر غير شائع. فمثلًا كثيرًا ما نلاحظ أثناء دراسة فعالية الأدوية المتنوعة لمعالجة الأمراض أن المرضى تحت التجربة الذين يتعاطون الأدوية غالبًا ما يعلنون أنهم يشعرون بتحسن سواء إذا كان الدواء يؤثر بالفعل أم لا. وحقيقة أنهم مراقبون فهذا يغير من استجابتهم للدواء. ويصبح من الضروري إعطاء دواء وهمي Placebo (مادة ليس لها تأثير بالمرة) دون إخبارهم بما إذا كانوا يأخذون دواءً وهميًا أو دواءً حقيقيًا. والفكرة هي مراقبة المرضى دون علمهم. فإذا كان الملاحظ ذكيًا بما فيه الكفاية، فهناك من الطرق التي يمكن ابتكارها حتى لا يشوه أو يتداخل رد الفعل الذاتي للمريض مع الملاحظة.

وعند ملاحظة المادة، يثار السؤال حول ما إذا كان من الممكن إيجاد طريقة لإجراء القياسات للدرجة المرغوبة من الدقة دون إحداث اضطراب لخطوات التجربة. وقد يكون هذا الأمر صعبًا جدًّا ويعني جهدًا أكبر مما تستحقه المعرفة المرغوبة، لكنه ومن حيث المبدأ أمر يجب أن يكون مفهومًا. افترض، مثلًا، أننا نرغب في إجراء تجربة لمشاهدة إلكترون لدراسة موجات الاحتمال التي تم وضعها في نظرية شرودنجر، فستكون هذه تجربة ذات أهمية كبيرة. اعتقد شرودنجر أن الحلول لمعادلته لا تعطي مجرد احتمال إيجاد إلكترون عند نقطة ما في المكان، لكنها في الواقع تعني أن الإلكترون نفسه قد انتشر في كل منطقة سحابة الإلكترون. واعتقد آخرون أنه من الممكن رؤية الإلكترون، ولو كان ذلك احتمالًا فقط، عند نقطة معينة من المكان. وحتى من الممكن ربما أن نرى الإلكترون يدور بحركة مغزلية فعلًا حول محوره.

كيف لإنسان أن يرى جسمًا من الصغر مثل الإلكترون أو حتى مثل الذرة؟ يمكن للمرء، بالفعل، أن يراه بمساعدة الضوء. إلا أننا نستخدم ضوءًا طول موجته حوالي خمسة آلاف ضعف قطر الذرة لمشاهدتها. وبنفس الطريقة فموجة المحيط التي تطيح بحصاة صغيرة لن تنزعج بوجود الحصى، فالضوء الذي يطيح بذرة لن يتأثر بشكل ملفت بوجود الذرة، ولن تستطيع رؤية أي تأثير لوجود الذرة على موجة الضوء. فطول الموجة كبير جدًّا (راجع شكل ٦-٥). وعلى المرء أن يستخدم «ضوءًا» ذا طول موجة أصغر في مثل صغر الذرة أو الإلكترون. وفي الواقع، يجب أن يكون طول الموجة أقل كثيرًا منهما، ويجب استعمال طول موجة قصير جدًّا كإشعاعات كهرومغناطيسية — الأشعة السينية أو حتى أشعة جاما — «لنرى» الإلكترون.

ولكن يأتي الآن دور الطبيعة المزدوجة للأشعة الكهرومغناطيسية. فالأشعة السينية أو فوتونات أشعة جاما الموجهة بواسطة موجاتها لها قدر لا بأس به من الطاقة وكمية الحركة، وذلك وفقًا لأفكار أينشتاين ودي برويل. وفي الواقع إن طاقتهما وكمية حركتهما ربما تكون أكبر ألف مرة من تلك الخاصة بالإلكترون المشاهد. فبمجرد تداخل الفوتونات مع الإلكترون، سيكون التصادم عنيفًا حتى إنه سينزع الإلكترون من مداره وهكذا فإن محاولة تحديد موقع الإلكترون بكثير من الدقة سيحدث اضطرابًا كليًّا للموقف. ويصبح من الضروري أن نقوم بالقياس بفوتونات ذات طول موجي أطول لتجنب اضطراب الإلكترونات المفرط، ولذلك فلن تكون دقة القياس بالجودة المرغوبة.

ووفقًا لنظرية الكم الميكانيكية للقياسات، ستجبر عملية المشاهدة الإلكترون على الدخول في حالة كمية معينة لم يكن ليدخلها بدونها. وقبل عملية القياس لم يكن معروفًا أين يوجد الإلكترون: فالقياس «وضعه» فعليًّا في مدار ما.

كان فيرنر هايزنبرج **Werner Heisenberg** الفيزيائي الألماني أول من عبر عن تلك الأفكار في صيغة مبدأ أطلق عليه مبدأ عدم التيقن لهايزنبيرج أو مبدأ اللامحدودية لهايزنبيرج. ينص المبدأ على أنه من المستحيل أن نقيس أو نتنبأ أو نعرف كلًّا من الموقع وكمية الحركة لجسيمة معًا في وقت واحد، بدقة للكميتين. وفي الواقع، الخطأ (أو عدم التيقن) في الموقع مضروبًا في الخطأ (أو عدم التيقن) في كمية الحركة لا بد أن يكون دائمًا أكبر من ثابت بلانك مقسومًا على 2π. فمثلًا، إذا كان الخطأ في إحدى الكميتين يقل عدديًّا عن $0.01h$ إذن لا بد أن يكون الخطأ في الكمية الأخرى أكبر من $100/2\pi$ أو حوالي ١٦. لاحظ أن مبدأ هايزنبيرج ينطبق على كميات أزواج معينة مرتبطة بعضها ببعض (المكان في اتجاه معين وكمية الحركة في ذات الاتجاه). وينطبق أيضًا على طاقة الجسيمة والزمن الذي عنده يكون لها هذه الطاقة. ولا ينطبق على قياسات كمية حركة وطاقة الجسيمة معًا في نفس الوقت. وعمومًا، ففي معظم المواقف القياسية، يكون عدم التيقن الذي يتطلبه مبدأ هايزنبرج صغيرًا جدًّا وبعيدًا عن المدى المتاح لأجهزة القياس، وعلى كل، هناك مواقف معينة يلعب المبدأ فيها دورًا مفيدًا. ومحاولة تحديد موقع الإلكترون في مدار الذرة، الذي ناقشناه واحد من هذه المواقف.

ولهذا المبدأ تأثير عميق على مناقشات الميتافيزيقا والمفاهيم الأساسية للمعرفة. لقد نُسفت تمامًا فكرة أن الكون يحدد معالمه تاريخه الماضي. وكان لابلاس قد اقترح

هذه الفكرة بشدة منذ حوالي مائتي سنة مضت نتيجة لنجاح ميكانيكا نيوتن. أعلن لابلاس أنه إذا كانت المواقع والسرعات لكل الأجزاء الصغيرة للمادة في الكون معروفة في وقت ما، وإذا كانت قوانين القوى المتنوعة معروفة أيضًا، فالمواقع وسرعات كل تلك الأجزاء الصغيرة للمادة يمكن حسابها والتنبؤ بها لأي فترة مستقبلية. فكل التأثيرات المستقبلية نتيجة أمور سابقة. وحتى لو كانت مهمة قياس كل هذه المواقع والسرعات مستحيلة بشريًّا، وحتى لو كان اكتشاف كل القوانين المناسبة مستحيلًا، إلا أن المواقع والسرعات كانت موجودة في زمن مضى وكذلك كانت القوانين؛ ولذلك فإن المستقبل محدد من قبل.

لكن مبدأ عدم التيقن لهايزنبرج يقول إن الأمر ليس كذلك. ومن حيث المبدأ، من المستحيل إجراء قياسات بدقة كافية أو حتى لنحسب منها مواقع وسرعات المستقبل؛ لأننا لا نستطيع أن نعرف مواقع وسرعات المستقبل. (وفقًا لأسلوب تفكير الوضعيين، إذا لم نستطع القياس، فإننا لن نستطيع أن نعرف أو نتنبأ ولا تستطيع الطبيعة نفسها أن تعرف أو تتنبأ.) وهناك حدود للسببية، لكن هذا لا يعني أن المستقبل مجهول تمامًا. نستطيع أن نحسب احتمالات حدوث أشياء في المستقبل، وإحصائيًّا سيتم تعضيد تلك الحسابات. أما بالنسبة للإلكترونات المنفردة فقط فإننا لا نستطيع التنبؤ بها.

ولا يتقبل الآن كل الفيزيائيين مبدأ عدم التيقن وتبعاته. وكان أينشتاين واحدًا من هؤلاء، الذين لم يتقبلوه، واشتبك مع بور وآخرين في سلسلة طويلة من المجادلات حول صحته. ولقد قام بالعديد من المحاولات لدحض المبدأ أو لإيجاد أمثلة تؤدي إلى إظهار أخطاء أو تناقض. واستسلم أينشتاين في النهاية بأن التنبؤات المبنية عليه صحيحة، لكنه صمم على أنه لا بد من وجود مبدأ أكثر إقناعًا بشكل ما ليفسر نتائج نظرية الكم، ويظل يحافظ على السببية تمامًا. كان دفاعه الرئيسي ذا حدس فلسفي، وهو أن «الرب لا يلعب النرد بالكون». وبالرغم من ذلك فالأسلوب السائد للفكر بين معظم الفيزيائيين اليوم هو أن مبدأ عدم التيقن صحيح ومفيد، ومن المؤكد أن هناك حدودًا للسببية.

استخدام النماذج في وصف الطبيعة

كانت كل المناقشات السابقة على الأغلب لطبيعة المادة والطاقة مبنية على استخدام النماذج. ومن المفترض أن النماذج تمثل «الواقعية الحقيقية» من مفهوم قصة الكهف الرمزية لأفلاطون. وقد كانت هذه من مميزات التطور التاريخي للفيزياء. وقد وصفها



فيرنر هايزنبرج ونيلز بور
(صورة بواسطة بول إرينفست الابن مكتبة نيلز بور بالمعهد الأمريكي للفيزياء).

النموذج السعري كمائع لا لون ولا وزن له. ووصف نموذج بور الذرة كمجموعة شمسية مصغرة. وعند مناقشة طبيعة الإلكترون، كان يعتبر لفترة أنه مثل كرة كروية صغيرة جدًّا يمكن أن تدور مغزليًّا حول محورها، ثم اعتُبر فيما بعد أنه مثل الموجة. واعتُبر أن للضوء طبيعة مزدوجة.

ربما نسأل لماذا نقدم هذه النماذج أو حتى لماذا نناقش نماذج قديمة أو نماذج بها عيوب ونحن نعلم أنها ليست صحيحة. ربما يجب ألا نحاول أن نجد «الواقعية الحقيقية» — أي شيء نلاحظه أو أي شيء موجود هو واقع، وربما ليس هناك أي شيء آخر ضمني في الوجود. إلا أن هناك سببًا عمليًّا جدًّا لاستخدام النماذج: إنها مريحة وتمكننا من حصر مجموعة معقدة من الظواهر الفيزيائية في بضع كلمات قليلة مترابطة نسبيًّا. ولقد جعلت من الممكن أن نستوعب وندمج الحقائق الجديدة والمعرفة في العقل البشري. فعندما يقال إن الذرة هي مثل مجموعة شمسية مصغرة، تقفز في الحال إلى العقل صورة تبين أن الذرة مكان خالٍ، وأنه من الممكن إزالة إلكترون منها أو أكثر، وهكذا. وعليه فإن النموذج لا يصلح فقط كتشابه بل أيضًا

يجعل من الممكن تخليق (في عقولنا) بعض الخواص الأخرى للذرات التي لولاها لما فكرنا فيها. لكن هل النموذج واقعي؟ فبعد كل ذلك، إذا كان شخص هاوٍ يبني نموذج طائرة ليضعه على رف في الحجرة، فمن المؤكد أن ذلك ليس شيئًا واقعيًّا. إنه تمثيل لشيء واقعي، ولا بد أن نضع ذلك في اعتبارنا عند فحصنا للنموذج. فمثلًا، لا يجب أن نتصور أن الآلات مصنوعة من البلاستك، أو إذا كان نموذج طائر، فلا بد أن نعتقد أن الآلات المستخدمة في النموذج تشبه الآلات الحقيقية، أو حتى تقدم النموذج بنفس خصائص الطيران كالشيء الحقيقي. وأدى كثير من تلك المآزق الخفية بالفيزيائيين إلى الشرود عند استخدام النماذج. وأدى ذلك إلى عدد من المتناقضات وإلى محاولات لتركيب نماذج منافسة لنفس مجموعة الظواهر.

وبالرغم من الإقرار بفائدة النماذج المزعومة للأغراض العملية إلا أن كثيرًا من الفيزيائيين قد دفعوا بأنه كلما أسرعنا في التخلي عن استخدام النماذج الصورية كلما تمكنا من تصور فهم أعمق للظواهر الفيزيائية بصورة أسرع. وعلى كل، فالنموذج لن يكون ذا فائدة إذا لم نستطع تناوله رياضيًّا لنرى إذا كان سيؤدي إلى مسايرة كَمية تفصيلية للبيانات التجريبية. ويجب أن يكون من الممكن التعبير عن النموذج بمدلول معادلات. وإذا كان الحال كذلك، فلماذا لا نهجر النموذج كلية، ونكتب فقط الافتراضات الرياضية الأساسية التي تؤدي إلى المعادلات؟ والأمر الضروري ألا تكون الافتراضات غير متسقة مع بعضها وألا يكون هناك الكثير منها. إذن يجب ألا أن نعير اهتمامًا لما إذا كانت هذه الافتراضات معقولة بمدلول بعض النماذج الساذجة أم لا.

وهكذا أصبح النموذج الآن مجموعة من المعادلات، ولكن لا يجب أن يكون هناك أي تساؤل عما إذا كان النموذج واقعيًّا أم لا. فالذرة ليست مجموعة من المعادلات.* وفي هذا المناخ أعد كثير من الاقتصاديين «نماذج» نظام للاقتصاد العالمي ووضعوا تنبؤات عادة ما تكون أليمة، حول ما سيحدث إذا استمرت بعض الاتجاهات المعينة.

وبينما كان شرودنجر يطور نموذجه الميكانيكي للموجة كان هايزنبرج وآخرون في الوقت نفسه تقريبًا يطورون وبدقة نماذج رياضية عن الظواهر الذرية. شعر هايزنبرج أن نموذج رذرفورد-بور-سمرفيلد مليء بالمتناقضات، وأن نموذج الذرة

*من المثير تمامًا منذ حوالي قرن مضى أن مدرسة هامة للفكر بين الفيزيائيين دفعت بأن الذرة ليست واقعًا، بل إنها تركيبات ذهنية فقط؛ حيث لم يستطيع أن يراها أحد بأي أجهزة، وأن وجودها كان تخمينيًّا فقط، وعليه فلا يجب أن يتكلم أحد عن نموذج الحركة الجزيئية للمادة.

يجب أن يستفيد مباشرة من الملاحظات التجريبية، المأخوذة بصفة رئيسية (لكن ليس كليًّا) من دراسات الأطياف المنبعثة من الذرات تحت ظروف الإثارة المتنوعة. واستفاد هايزنبرج من خواص الكميات الرياضية المسماة المصفوفات، ولذلك سميت نظريته بميكانيكا المصفوفات. وقد استخدم فروضًا مختلفة عما استخدمه شرودنجر، ولم تعجبه نظرية شرودنجر. وعلى الجانب الآخر، وجد شرودنجر أن افتراضات هايزنبرج «منفرة». ومن المثير بما فيه الكفاية، أن شرودنجر (وآخرين أيضًا) سرعان ما استطاعوا أن يبينوا أن نظريته ونظرية هايزنبرج متكافئتان رياضيًّا! بدأ شرودنجر بفكرة أن الظواهر الفيزيائية بطبيعتها مستمرة وأنه تحت ظروف معينة (الظروف الحدودية المناسبة) تظهر الكنتمة والكوانتا. إلا أن هايزنبرج قد بدأ بافتراض ظواهر الكنتمة عند المستوى الأساسي. وضمَّن أيضًا في افتراضاته صيغة لمبدئه عن عدم التيقن. وكثيرًا ما تستخدم حسابات كل من نهج شرودنجر وهايزنبرج معًا لأنه يمكن استخدام نظرية شرودنجر لحساب كميات معينة مطلوبة في نظرية هايزنبرج.

ولقد استخدم ديراك صيغة أكثر إيجازًا عندما طور الميكانيكا الكمية النسبية وكانت هذه الصيغة متسقة مع استخدام كل من ميكانيكا الموجة وميكانيكا المصفوفات.

ولقد أشرنا في بداية هذا الفصل إلى أنه كثيرًا ما نسلم بأن هناك تطويرًا أكثر لم يأت بعد لنظرية مهيمنة تكون أكثر عمومية عن الميكانيكا الكمية النسبية. كان البعض في بعض الأحيان يتأمل، أو حتى يأمل، أن تتضمن هذه النظرية الجديدة مفاهيم داخلها أو متغيرات نحن الآن غير واعين بها. وتسمى هذه الأشياء في بعض الأحيان المتغيرات الخفية. وأولئك غير المتقبلين لمبدأ عدم التيقن، بالرغم من أنهم مضطرين حاليًّا إلى التسليم بشرعيته الواضحة، يعتقدون أن المتغيرات الخفية ستعيد تمامًا السببية للفيزياء. ومن المؤكد أن هناك تطورات نظرية جديدة يبدوا أنها على مشارف احتمال توحيد ليس فقط نظرية النسبية ونظرية الكم بل أيضًا نظرية الجاذبية ونظرية القوى المتنوعة النشطة داخل نواة الذرة. سنناقش بعضًا من ذلك في الفصل القادم بالرغم من أن المتغيرات الخفية المرغوبة لم تحتويها تلك التطورات.

تأثير نظرية الكم على الفلسفة والأدب

من الواضح أن نظرية الكم تضع حدودًا للسببية الصارمة المرتبطة بالفيزياء النيوتونية الكلاسيكية. ويرى بعض الكتاب أن مبدأ هايزنبرج، قد أتاح مفهوم مبدأ

الإرادة الحرة على المستوى الأساسي للعالم المادي، لأن قرارات الإرادة الحرة هي بالضرورة غير قابلة للتنبؤ بها. وهذا ليس معناه أن الإلكترون المفرد «سيختار» أن يسلك بطريقة غير متوقعة بل بتأثيرات غير فيزيائية (مثلًا الإرادة البشرية أو تدخل إلهي) قد تؤثر على سلوك مادة الكون. ومن هذا المنطلق فقرارات الإرادة الحرة لا يمكن تمييزها عن القرارات العشوائية. إلا أنه، يجب التأكيد على أنه ربما يكون مسلك معين للذرات والجزيئات المنفردة غير ممكن التنبؤ به، فالإحصائية العامة الناتجة من الأعداد الفلكية للذرات والجزيئات التي تكون خلية بيولوجية بسيطة هي مهولة لدرجة أن متوسط سلوك العدد الكبير جدًّا من الذرات في الخلية البيولوجية يمكن توقعه بدرجة عالية، ونادرًا جدًّا أن يحدث حيود ذو أهمية. وهكذا فليس واضحًا أننا يجب أن نعتقد أن الكون محكوم وفق فيزياء حديثه تسمح بحرية أكثر للاختيار أكثر من كونه عالمًا محكومًا وفق الفيزياء الكلاسيكية.

ولقد فسر بعض الكتاب مبدأ عدم التيقن على أنه استعراض لوجود حدود لما يمكن معرفته بحس مادي، قائلين إننا نستطيع أن نزعم أننا لا نعرف إلا أشياء نستطيع قياسها. والأشياء التي من حيث المبدأ لا يمكن قياسها هي من ثم غير قابلة للمعرفة، ولذلك غير موجودة في الحس المادي.

وكما قد يتصور البعض، أن كثيرًا من المفكرين يعتبرون مثل هذا الإصرار على غياب السببية أو وجود حدود للمعرفة إهانة. ولذلك كان هناك جدال حيوي، تقريبًا منذ البداية الأولى لنظرية الكم بين الفيزيائيين والفلاسفة وفلاسفة العلوم حول هذه الأمور، التي هي الجذور الأصلية للمفاهيم الأساسية حول المعرفة. ويميل الفلاسفة إلى النظر إلى الفيزيائيين على أنهم قد يتسمون بالسذاجة في رؤيتهم لمثل هذه الأمور، أما الفيزيائيون فيعتبرون الفلاسفة على غير دراية بالواقع الفيزيائي. وعلى كل، كما ذكرنا من قبل، هناك عدم اتفاق بين الفيزيائيين أنفسهم حول تفسير نظرية الكم. وهناك تعليق ببليوجرافي مفصل ودليل لبعض المقالات العديدة والكتب عن التفسيرات «الصحيحة» لنظرية الكم وأسسها وتضميناتها الميتافيزيقية-الفلسفية في مقال بواسطة دي ويت وجراهام De Wutt and Graham مدون في المراجع في نهاية هذا الفصل.

كان الرأي السائد بين الفيزيائيين بالنسبة لأهمية وتفسير نظرية الكم قد طوره مجموعة من الفيزيائيين تسمى مدرسة كوبنهاجن، وكان من أشهر أعضائها نيلز بور وفيرنر هايزنبرج. وكمثال لمنهج فكرهم كان مبدأ التكاملية complementarity،

الذي قدمه بور سنة ١٩٢٨ لكي يعرض مبدأ عدم التيقن لهايزنبرج بمدلولات أكثر عمومية. ينص مبدأ التكاملية على أنه على مستوى الأبعاد الذرية وأصغر من ذلك، ليس من الممكن ببساطة وصف الظواهر بالكمال المتوقع من الفيزياء الكلاسيكية. وبعض القياسات أو المعرفة المطلوبة للوصف الكامل من وجهة النظر الكلاسيكية، مثل الموقع وكمية الحركة، تكون إما متناقضة أو حصرية تبادليًّا، إذا كان تعريف هذه المقادير مفهوم جيدًا بمدلولات كيفية قياسها. في أي لحظة قيست إحدى الكميات بعيدًا عن مستوى معين من الدقة، تتشوه الكميات الأخرى لدرجة أن تأثير اضطراب القياس عليها لن نتمكن من قياسه دون التداخل مع القياسات الأصلية. وهذه النتيجة متأصلة في تعريفات الكميات التي تُقاس. ويستمر المبدأ إلى أن ينص على أن هناك غرض وتأثير، لكن أي من الكميات يمكن استخدامها في وصف علاقة الغرض والتأثير لا بد من فهمها. وأشياء مثل موقع الإلكترون في الذرة وكمية حركته ليست هي الكميات المناسبة للقياس، بل بالأحرى دالة الحالة (البديل والاسم الأفضل لدالة موجة الإلكترون هو الذرة).

وعلى مستوى آخر، فقد اقترحت فكرة وجود حدود أساسية لقياس كميات معينة في الفيزياء على العاملين في مجالات أخرى أنه ربما تكون هناك حدود أساسية مشابهه في نظمهم على الكميات التي تقاس أو تعرَّف. ومحاولة قياس هذه الكميات في مستويات تتخطى مستويات دقة متأصلة يشوه كميات أخرى مكملة معينة. وهكذا فإن فكرة التكاملية ربما يكون لها أهمية في الفروع الأخرى من المعرفة.

وكثيرًا جدًّا ما نرى إغراءً قويًّا لاستخدام مبادئ رئيسية في الفيزياء بشكل غاية في البساطة لوصف الكون عند كل المستويات. وهكذا وبتتبع أعمال نيوتن، قال البعض إن العالم محدد سابقًا من كل الأوجه ويعمل مثل عمل الساعة الدقيقة الكبيرة. وأثر هذا على تطور العلوم الاجتماعية المبكرة. وبعد تطور الإنتروبيا وفهم القانون الثاني للديناميكا الحرارية، ما زال آخرون يصرون على أن الكون، مأخوذ ككل، لا بد أنه في طريقة إلى الهلاك. واقترح بعض النقاد الاجتماعيين أن التهالك المصاحب للقانون الثاني واضح في الفن الحديث وحتى في المجتمع الحديث. وعلى الجانب الآخر رحب البعض بميكانيكا الكم لأنها جعلت من الممكن وجود الإرادة الحرة ونهاية كل اعتبارات القضاء والقدر. وواضح أن هذه النهايات مبالغ فيها.

وكيف يجب إذن رؤية استخدام الفيزياء في مجالات خارج العلوم الفيزيائية والتكنولوجية؟ وبعيدًا عن تعظيم تقديرنا لجمال وعظمة الكون الفيزيائي، فقد

قدمت الفيزياء أفكارًا جديدة ونظرة لا بد من تبريرها بشكل رئيسي بالحاجة إلى مجالات أخرى للسعي. وهكذا يمكن للفيزياء أن تقدم تشابه مفيدًا نبني عليه وسائل جديدة في التحليل وأشكال ذات نظرات ثاقبة في الحديث.

وتبدو مثل هذه الاستخدامات للفيزياء واضحة بعض الأحيان في الأدب. ومن المؤكد أن مفاهيم من الفيزياء الحديثة، من كلٍّ من النسبية ونظرية الكم، قد أثرت على أعمال كثيرة في الخيال الحديث. ولقد استخدم كتاب من أمثال جوزيف كونراد ولورنس دوريل وطوماس بينكون ووليم جاديس وروبرت كوفر وروبرت بيرسيج أنواعًا متنوعة من هذه المفاهيم في كتاباتهم بدرجات مختلفة من النجاح. وقد ناقش ذلك فريدمان ودونلي في كتابهما عن أينشتاين، وفي مقال كتبه آلان فريدمان عن الخيال الأمريكي المعاصر، وهو مذكور في مراجع هذا الفصل.

الفصل الثامن

مبادئ الحفاظ والتماثلات

أساسًا، الأشياء لا تتغير أبدًا موراي جيل-مان



المعهد الأمريكي للفيزياء
(معرض ميجرز للحائزين على جائزة نوبل).

منذ الأزمنة الأولى وعلى الأقل منذ الإغريق القدماء اعتقدت البشرية أن هناك قوالب بناء أساسية، أو جسيمات تكوِّن كل شيء. اعتقد ليوسيبس وديمقريطس (حوالي سنة ٤٠٠ق.م) أن المادة يمكن أن تنقسم إلى حد معين، وعند هذه النقطة

نصل إلى أصغر جسيمة ممكنة. أطلق ديمقريطس على هذه الجسيمة الأساسية الذرة (Atom والتي تعني غير قابلة للقسمة). وأيقن أرسطو أنه لا بد أن يكون هناك أكثر من نوع من الجسيمات الأساسية لتعبر عن وجود الخصائص المختلفة للمواد المختلفة. واعتبر أرسطو أن كل شيء على الأرض يجب أن يتكون من كميات مختلفة من الأرض والماء والهواء والنار وتلك هي عناصره الأساسية.

ومع تطور علم الكيمياء تم إقرار وجود حوالي مائة عنصر مختلف وأن كل المواد تتكون من اتحادات متنوعة من تلك العناصر. وتتراوح تلك العناصر بين أخف العناصر: الهيدروجين والهليوم، وأثقل العناصر الموجودة في الطبيعة: اليورانيوم. واقترح جون دالتون الكيميائي الإنجليزي سنة ١٨٠٢ أن كل عنصر له ذرة متميزة لا يمكن إفناؤها أو شطرها أو تخليقها. كما اقترح أن ذرات نفس العنصر تتشابه في الحجم والوزن وكل الخواص الأخرى لكنها تختلف عن ذرات العناصر الأخرى. والاسم «الذرة» تم اختياره بسبب العلاقة الواضحة مع المفهوم الأصلي لمفهوم ديمقريطس.

ونعرف الآن أن ذرة دالتون قابلة للتقسيم وأنها مكونة من جسيمات «أساسية» حقيقة. وبحلول ثلاثينيات القرن العشرين عرف أن الذرة تتكون من نواة تحوي النيوترونات والبروتونات، وأن الإلكترونات تدور حول النواة (راجع الفصل السابع). ولفترة من الزمن اعتبرت تلك الجسيمات الثلاثة هي عصب بناء المادة. إلا أنه تم إجراء العديد من التجارب منذ أربعينات القرن العشرين، التي أشارت إلى أنه حتى النيوترونات والبروتونات تتكون من جسيمات أساسية أخرى. ولقد أجريت في الواقع هذه التجارب في وجود متسارعات الجسيمات ذات الطاقة العالية المتنوعة (ما يطلق عليه محطم الذرة) التي كشفت عن المئات من أنواع الجسيمات التي يمكن الحصول عليها عند تصادم أنوية الذرات. وأصبح الفيزيائيون خلال خمسينيات وستينيات القرن العشرين مهتمين بشكل متزايد بهذا التكاثر للجسيمات تحت النووية المعروفة، وتساءلوا عما إذا كانت كل هذه الجسيمات عناصر بناء أساسية.

وحتى بمواصلة زيادة اكتشاف عدد الجسيمات تحت النووية تجريبيًّا اصطدم كثير من الفيزيائيين بحقيقة أن كثيرًا من التفاعلات المتوقعة بين الجسيمات تحت النووية لم تلاحظ. ويبدو أن التفسير الوحيد لهذه التفاعلات الغائبة أن هناك نوعًا جديدًا من قوانين الحفاظ التي يبدو واضحًا أنها ستنتهك إذا تمت تلك التفاعلات. وببطء اكتشفت قوانين الحفاظ الجديدة هذه. وعرف الفيزيائيون من تجارب سابقة أن كل قانون للحفاظ يعني بنية معينة أو تماثلًا في الطبيعة.

وفي سنة ١٩٦١ اكتشف موراي جل-مان بمعهد التكنولوجيا بكاليفورنيا ويوفال ليمان (فيزيائي إسرائيلي) مخطط تقسيم جديد هام للجسيمات تحت النووية مبنيًّا على التماثلات التي تعنيها قوانين الحفاظ. وقاد تخطيط التقسيم الجديد هذا، بدوره، جيل-مان ليقترح أن العدد الكبير من الجسيمات تحت النووية يتكون كله من عدد قليل فقط من الجسيمات، التي سماها كواركات quarks. وأدت الأبحاث المتعاقبة التي قام بها الفيزيائيون إلى تقبل نموذج الكوارك على أنه نموذج صحيح، ويأمل الفيزيائيون أن تكون تلك الكواركات الآن هي بالفعل قوالب البناء الأساسية للطبيعة التي طال البحث عنها.

يبدأ هذا الفصل بمناقشة بنية النواة، بدءًا بفهمنا الذي كان سائدًا وقت اكتشاف النيوترون سنة ١٩٣٢. وسنتتبع التطور المتعاقب لفهم طبيعة النواة والقوة المذهلة التي تحافظ عليها ونناقش اكتشاف بعض الجسيمات تحت النووية الجديدة. وبعد ملخص موجز لمعلوماتنا عن الجسيمات تحت النووية حوالي سنة ١٩٦٠، سنرى كيف أن الدراسات الدقيقة لقوانين الحفاظ المتحكمة في التفاعلات البينية بين الجسيمات تحت النووية قد أدى إلى اكتشاف تماثلات جديدة هامة في قوانين الفيزياء المتحكمة في خصائص الجسيمات تحت النووية. وسنرى كيف قادت هذه التماثلات الجديدة إلى نموذج الكوارك ودراسة مشاكله ونجاحاته. وفي النهاية سنحاول أن نوجز معرفتنا الحالية عن قوالب البناء «الأساسية» ونشير إلى التطورات المستقبلية المحتملة. ولأبحاث قوالب البناء الأساسية للطبيعة تاريخ علمي طويل. وأحد الأهداف الرئيسية لهذا الفصل ستكون رؤية كيف أن دراسة قوانين الحفاظ والتماثلات ذات الصلة قد قادت إلى واحد من أهم التطورات في تاريخ الفيزياء.

القوة النووية والبنية النووية

وكما ناقشنا في الفصل السابق، فإننا نعلم أن الذرة هي ذرة نووية، أي أن بها نواة. وتحتوي النواة على أكثر من ٩٩,٩ بالمائة من كتلة الذرة. وأكثر من ذلك، فإن تلك الكتلة محصورة في حجم صغير جدًّا. وأشارت تجارب متنوعة إلى أن قطر النواة العادية (مثلًا نواة ذرة الكربون) أقل من ١٠^{-١٤} متر (واحد من مائة من ألف من بليون من المتر) الذي هو حوالي ٠,٠١٪ من قطر الذرة فقط. ولأن كتلة الذرة كلها تقريبًا تتركز في مثل هذا الحجم الصغير جدًّا فكثافة المادة في النواة عالية جدًّا. كثافة المادة في النواة حوالي ١٠^{١٧} كجم/م^٣ أو مائة مليون بليون كيلو جرام لكل

متر مكعب!* ويجب ألا نندهش من وجود ظواهر فيزيائية جديدة متضمنة في بنية النواة لم تر على الإطلاق على مقياس أكثر تناولًا.

ولمدة تزيد عن خمسين سنة كان معروفًا أن النواة تحتوي على بروتونات ونيوترونات. وتزيد كتلة النيوترون عن كتلة البروتون بمقدار طفيف وكلاهما حوالي $١٫٧ \times ١٠^{-٢٧}$ كيلو جرام. وقطر كل منهما، النيترون أو البروتون معروف أنه أكبر قليلا من $١٠^{-١٥}$ متر. والبروتون له شحنة موجبة مساوية تمامًا في المقدار للشحنة السالبة على الإلكترون، والنيوترون ليس له محصلة شحنة. ويحدد عدد البروتونات العنصر الذي ستصبح عليه الذرة المتعادلة (الذرة المتعادلة بها عدد الإلكترونات المحيطة بالنواة مساوٍ تمامًا لعدد البروتونات في النواة). وتحتوي الأنوية عادة على نفس العدد من النيوترونات والبروتونات، ما عدا في العناصر الثقيلة مثل الرصاص والبزموث واليورانيوم، حيث يزيد عدد النيوترونات بشكل كبير عن البروتونات. والأنوية التي تحتوي على نفس عدد البروتونات ولكن على أعداد مختلفة من النيوترونات يقال إنها نظائر لنفس العنصر. وسيكون لها نفس عدد الإلكترونات التي تحيط بالنواة وعليه ستسلك كيميائيًّا بشكل متطابق.

من المهم أن نشير إلى أنه إذا اعتبرنا فقط القوتين الأساسيتين اللتين ناقشناهما حتى الآن، فلا بد أن نستخلص أن أي نواة لا بد أن تكون غير مستقرة تمامًا. فنواة تتكون من بروتونات ونيوترونات هي نواة تحتوي على شحنات «متماثلة» وعلى شحنات «غير متماثلة». وحيث إن الشحنات المتماثلة ستتنافر، ونحن نعرف أن القوة الكهرومغناطيسية تحاول أن تفرق كل النوويات عن بعضها (ما عدا الهيدروجين حيث يحتوي على بروتون واحد فقط في نواته). ما الذي يجعل النواة متماسكة إذن؟

والقوة الأخرى الوحيدة التي نوقشت حتى الآن هي قوة الجاذبية. وإذا حاولنا أن نرى ما إذا كان التجاذب بين النيوترونات والبروتونات في النواة يمكن أن يحافظ على النواة أم لا، فسنجد أن التجاذب ضعيف جدًّا. وإذا افترضنا أن قوة التجاذب بين النيوترونات والبروتونات في النواة نحصل عليها بواسطة نفس المعادلة التي تعطي قيمة صحيحة للجاذبية بين القمر والأرض أو الأرض والشمس أو أي جسمين كبيرين؛ نجد أن الجاذبية أضعف من التنافر الكهرومغناطيسي بمعامل حوالي $١٠^{٣٩}$!

*أعداد مثل $١٠^{-١٤}$ أو $١٠^{١٧}$ نرجع إليها على أنها «مفاهيم علمية» حيث يشير الأس إلى كم من الخانات العشرية لتحريك العلامة العشرية. وعليه $١٠^{١٧}$ هو الرقم ١ يتبعة ١٧ صفرًا ثم العلامة العشرية، $١٠^{-١٤}$ هو العدد ١ مسبوقًا بـ ١٣ صفرًا ثم العلامة العشرية.

ومن الواضح أن هناك نوعًا آخر من قوى التجاذب حتى يمكن تفسير ثبات النواة. يطلق على هذه القوة الجديدة القوة النووية القوية ولقد درست على مدى ما يزيد عن خمسين سنة. وتعمل هذه القوة بين النيوترونات والبروتونات في النواة ولكن ليس لها تأثير على الإلكترونات المحيطة. إنها أقوى بحوالي مائة مرة عن قوة التنافر الكهرومغناطيسية، وهكذا فالنوويات التي بها أكثر من مائة بروتون تكون غير مستقرة لأن التنافر الكهرومغناطيسي، الذي يستمر في الزيادة، يصبح في النهاية أكبر من القوة النووية الجاذبة، التي لا تستمر في الزيادة (يقول الفيزيائيون إنها تتشبع).

تختلف القوة النووية القوية كثيرًا عن القوة الكهرومغناطيسية أو قوة الجاذبية. وكلا القوتين الأخيرتين ذات مدى غير محدود (تعمل قواتهما عند كل المسافات)، بالرغم من أنهما يصبحان أضعف عند المسافات الأكبر (قانون التربيع العكسي المشروح من قبل). وعلى النقيض فالقوى النووية القوية ذات مدى محدود. فلا بد للنوويتين (سواء نيترونات أو بروتونات) أن يتلامسا تقريبًا، لكن ليس تلامسًا كاملًا، قبل أن «تعمل» القوة النووية الجاذبة القوية. وميزة المدى المحدود للقوة النووية هو أنه قد نتج عنها في بعض الأحيان ما يطلق عليه «الصمغ» النووي، لأن الصمغ يعمل فقط عندما توضع الأشياء في موضع تلامس مع بعضها البعض. وتختلف القوى النووية القوية عن الكهرومغناطيسية والجاذبية أيضًا في أنه ليس هناك تعبير رياضي بسيط يسمح للمرء بحساب شدة القوة لموقف ما. ومعروف أن القوة النووية تعتمد على العديد من المتغيرات المختلفة بأشكال معقدة. وبالرغم من أن الفيزيائيين النوويين قد درسوا القوى النووية عدة سنين، فإنهم لم يستطيعوا أن يجدوا أي تعبير بسيط ليصف شدة القوة. وسنرى فيما بعد في هذا الفصل سببًا لوجود هذا الموقف.

بالإضافة إلى القوى الكهرومغناطيسية والجاذبية والنووية القوية هناك قوة أساسية أخرى، معروف أنها موجودة. هذه القوة تعرف بأنها القوة النووية الضعيفة. وهي مسئولة عن نوع معين من التحلل الإشعاعي يعرف بتحلل أشعة بيتا. ويعود التحلل الإشعاعي إلى الانبعاث التلقائي لجسيمة أو أكثر بواسطة النواة. وتتحول النواة المنحلة بنفسها إلى نواة من نوع آخر. وفي أبسط أنواع التحلل بأشعة بيتا، يتغير نيوترون داخل النواة إلى بروتون وإلكترون، وينطلق الإلكترون خارج النواة. وتقل القوة النووية الضعيفة عن القوة النووية القوية بمعدل حوالي $١٠^{١١}$ مرة،

ولسنا في حاجة إلى أخذها في الاعتبار أكثر من ذلك في مناقشتنا البسيطة للبنية النووية. وهناك أنواع عديدة أخرى من التحلل النووي بجانب تحلل أشعة بيتا، وفيه تنطلق أنواع أخرى من الجسيمات.

وتاريخيًّا، قدمت دراسات المواد المشعة بطبعها أول مفاتيح الألغاز بالنسبة للبنية النووية. ولأكثر الجسيمات المنطلقة شيوعًا من العناصر المشعة أعطيت أسماء الحروف الأولى من الأبجدية اليونانية، فتسمى جسيمات ألفا وبيتا وجاما. ونعرف الآن أن جسيمات ألفا هي نواة ذرة الهليوم، التي تتكون من بروتونين ونيوترونين، وأن جسيمة بيتا هي إلكترون، وأن جسيمة جاما (تسمى على الأغلب أشعة جاما) هي كم عالٍ من الطاقة الكهرومغناطيسية، يعرف أيضًا بالفوتون. وبالرغم من أن الفيزيائيين النوويين ما زالوا يدرسون تحلل الإشعاع الطبيعي، إلا أنهم كثيرًا ما يدرسون الأنوية عن طريق قذف نواة هدف ثابت بأشعة جسيمات متنوعة عالية السرعة، مثل بروتونات أو جسيمات ألفا أو إلكترونات. وتقدم مثل هذه التصادمات طريقة لإضافة جسيمات وطاقة (من طاقة الحركة للجسم من الجسيمة الساقطة) إلى الأنوية بطريقة محددة بدقة في سبيل دراسة كيف تتحول الأنوية إلى أنوية أخرى وتتفكك إلى جسيمات أساسية. تسمى مثل هذه التجارب بالتفاعلات النووية لأنها تنتهي بفصل أو إنتاج أو اتحاد جسيمات أساسية أو مجموعة من الجسيمات من النواة. وكل المعلومات المعروضة هنا تقريبًا فيما يخص البنية النووية وأنواع الجسيمات التي وجدت داخل النواة قد تم الحصول عليها من دراسات دقيقة أجريت في معامل تسارع متنوعة حول العالم تعمل على تصادم الجسيمات مع الأنوية.

وبعد فترة وجيزة من التيقن من المزايا الأساسية للقوى النووية القوية (وتحديدًا، شدتها ومداها المحدود) اتخذت خطوة في منتهى الأهمية نحو الفهم الأساسي لطبيعة هذه القوة. اقترح الفيزيائي الياباني هيدكي يوكاوا Hideki Yukawa سنة ١٩٣٥ نظرية تفسر القوة النووية على أنها تعود إلى تبادل كتلة كوانتا محددة (أو جسيمات). يعرف هذا النوع من وصف القوة بنظرية المجال-الكمي؛ لأن اقتراح مجال القوة يتكون من كوانتات «خيالية» يتم تبادلها بين النوويات عندما تتواجد داخل مدى القوة النووية. والجسيمة «الخيالية» هي الجسيمة التي قد توجد فقط لفترة قصيرة ولا يمكن مشاهدتها بالتجربة إلا عند إضافة كمية كبيرة من الطاقة لتجعلها واقعًا. ويسمح مبدأ عدم التيقن لهايزنبرج بوجود الجسيمات الخيالية.

كان معروفًا أن نظرية المجال الكمي موجودة بالنسبة للقوة الكهرومغناطيسية، وأول من اقترحها بالنسبة للقوة النووية القوية هو فيرنر هايزنبرج سنة ١٩٣٢. وفي نظرية المجال الكمي بالنسبة للقوة الكهرومغناطيسية يسود الاعتقاد أن الكوانتا التي يتم تبادلها بين الجسيمات المشحونة هي كوانتا الضوء أو الفوتونات. وتحاط كل شحنة كهربية بسحابة من الفوتونات الخيالية، التي تنبعث وتمتص عن طريق الجسيمات المشحونة باستمرار. وعندما تقترب جسيمتان إحداهما من الأخرى فإنهما تتبادلان الفوتونات الخيالية، وذلك بأن تبعث جسيمة مشحونة فوتونًا وتمتص الجسيمة المشحونة الأخرى ذلك الفوتون والعكس صحيح. ويظهر هذا التبادل المستمر بين الاثنين في القوة الكهربية بينهما. وفي هذه النظرية الميكانيكية- الكمية تكون كتلة الفوتونات التي هي صفر هي نفسها التي تجعل القوة الكهرومغناطيسية ذات مدى غير محدود.

ووفقًا ليوكاوا، وبسبب المدى القصير للقوى النووية، فإن الأنوية تُحاط بسحابة من الكوانتات الخيالية ذات الكتلة، التي تطلقها أو تمتصها النوويات باستمرار. وإذا اقتربت نووية أخرى من النووية الأولى فستنطلق جسيمة من إحداهما وتمتص بواسطة الأخرى والعكس صحيح. وينتج عن تبادل الجسيمات هذا قوة بين النوويتين. استطاع يوكاوا (مستخدمًا مبدأ عدم التيقن لهايزنبرج) أن يقدر كتلة الجسيمات المتبادلة. وكانت النتيجة هي إذا كانت نظرية المجال-الكمي صحيحة، فلا بد من وجود جسيمة جديدة لها كتلة حوالي سُبع كتلة النيترون أو البروتون. لاحظ أن هذه الكتلة ما زالت حوالي ٢٧٠ مرة أكبر من كتلة الإلكترون، وعليه فإن جسيمة يوكاوا الجديدة لم تتفق بطريقة واضحة مع أي جسيمة معروفة في ذلك الوقت. وعلى النقيض من نظرية المجال-الكمي للقوة الكهرومغناطيسية يتطلب اقتراح يوكاوا وجود جسيمة جديدة لم تكتشف. وواضح أن الاكتشافات التجريبية لجسيمة يوكاوا تقدم دعمًا قويًّا لوصف المجال الكمي للقوة.

وفي سنة ١٩٤٧ تم اكتشاف الجسيمة المتوقعة حيث انبعثت أثناء التفاعلات النووية الناتجة عن تأثير الأشعة الكونية ذات الطاقة العالية في الفضاء (على الأغلب بروتونات). وسميت الجسيمات باي-ميزون Pi-mesons واختصارًا بيون Pion. وحصل يوكاوا على جائزة نوبل في الفيزياء لأبحاثه على ذلك الموضوع سنة ١٩٤٩.

وأظهرت الأبحاث النظرية والتجريبية المتعاقبة أنه ليس من البساطة تفسير القوة النووية بواسطة تبادل الباي ميزونات فقط. وأصبح معروفًا الآن أنه لكي

نقدر المزايا المتنوعة للقوة النووية داخل إطار نظرية المجال-الكمي، على المرء أن يُضمِّن التبادل اللحظي لأكثر من باي ميزون واحد أو حتى تبادل كوانتات مجال ذي كتلة أكبر. وبالرغم من ذلك فإن صحة نظرية يوكاوا مقبولة عالميًّا.

وفي الواقع، من المعتقد الآن، أن كل القوى الأساسية قد وصفتها نظريات من نوع المجال-الكمي. ولأن قوة الجاذبية غير محددة المدى (مثل القوة الكهرومغناطيسية) فلا بد أن لها تبادلًا كميًّا كتلته صفر. وتسمى الجسيمة الضرورية هنا بالجرافيتون graviton ويعتقد عامة أنه موجود، بالرغم من عدم مشاهدته تجريبيًّا. ونتيجة أن قوة الجاذبية ضعيفة لدرجة كبيرة، فمن المتوقع أن يحمل كل جرافيتون كمية ضئيلة من الطاقة. ومن المتوقع أن مثل هذه الكوانتات ضئيلة الطاقة حتى إنه من الصعب اكتشافها، ولم يندهش معظم الفيزيائيين من أن الجرافيتون قد هرب من التحقق التجريبي. ويُجري العديد من مجموعات العلماء حول العالم تجارب مستفيضة (وصعبة) في محاولة العثور على الجرافيتونات.

وعلى الجانب الآخر، فالجسيمات المتبادلة للقوى النووية الضعيفة تسمى البوزونات وسيطة المتجه وهي كثيفة الكتلة حتى إنه لا يوجد حاليًّا أي متسارع (محطم للذرة) يمكنه إعطاء طاقة حركة كافية «لتكوين» هذه الجسيمات بالطرق العادية بقذف الأهداف الثابتة بأشعة جسيمات ذات طاقة عالية. والقوى النووية الضعيفة ليست فقط أضعف كثيرًا من القوة النووية القوية، بل هي أيضًا أقصر كثيرًا في المدى، وهكذا بنفس الجدل الذي مكَّن يوكاوا من تقدير كتلة الباي ميزون، عرف الفيزيائيون النوويون أن كتلة البوزونات وسيطة المتجه لا بد أن تكون كبيرة جدًّا. في سنة ١٩٨١ وسنة ١٩٨٣ استخدم الفيزيائيون في مركز الأبحاث النووية الأوربي European Center for Nuclear Research (CERN) تقنية تجريبية جديدة تتضمن تصادم أشعة فوتونات عالية الطاقة مكنتهم من الحصول على طاقات تفاعل أكبر كثيرًا عن تلك المحتملة مع الأهداف الثانية. واستطاعوا أن يميزوا البوزونات وسيطة المتجه في نتائج التفاعل. ووجدوا أن كتلة تلك الجسيمات قريبة جدًّا من تلك المقدَّرة في السابق، وحوالي مائة مرة أكبر من كتلة البروتون.

ومن المثير أن نلاحظ أن مفهوم نظرية المجال-الكمي التي «تفسر» القوة على أنها تبادل جسيمات خيالية هي واقعيًّا آخر محاولات العلماء لفهم مشكلة «الحدث عن بعد» المشروحة من قبل في هذا الكتاب. لكن كيف لجسمين، ليسا على اتصال مباشر معًا، أن يؤثر كل منهما في الآخر. كان ذلك سؤالًا أساسيًّا خطيرًا (وأثير

حتى في أيام نيوتن). فالأثير الافتراضي، تم افتراضه في الأساس ليفسر كيفية انتقال الضوء عبر الفضاء الخالي، وكان يعتقد أيضًا أنه يساعد في تفسير مشكلة الحدث عن بعد. وأصبح الآن مقبولًا عامة من معظم الفيزيائيين أن نظرية المجال-الكمي ربما أخيرًا قد قدمت تفسيرًا لمشكلة شغلت الناس كثيرًا. وحتى وبالرغم من أن فكرة يوكاوا الأصلية لوصف القوة النووية القوية على أنها تعود إلى تبادل الباي ميزونات فقط كان معروفًا أنها غير صحيحة، إلا أن تنبؤاته للجسيمة الجديدة بناء على هذه النظرية واكتشافه التجريبي أدت إلى القبول العام بوصف المجال-الكمي للقوى الأساسية. وسنرى فيما بعد في هذا الفصل أن السبب في أن أكثر من نوع من الجسيمات المتبادلة مطلوب لوصف القوة النووية القوية ربما يعود إلى أن القوة النووية القوية ليست في الواقع إحدى القوى الأساسية، بل بالأحرى يمكن وصفها بدقة أكثر على أنها بقايا تداخل تبقى من قوة أكثر كثيرًا في الشدة كانت موجودة داخل النوويات.

وكان لنظرية يوكاوا تأثير هام آخر في تطور الفيزياء النووية. فقد كان لتنبؤ يوكاوا بوجود جسيمة أخرى بجانب النيوترونات والبروتونات داخل الأنوية الفضل في تقديم الكثير من الدوافع الأصلية للبحث عن أنواع جديدة من الجسيمات «الأساسية». وفعلًا بعد مدة قصيرة من اكتشاف البيون اكتُشفت جسيمة مختلفة، تسمى ميون muon، ولمدة قصيرة وعن خطأ اعتقد أنه جسيمة التبادل التي تنبأ بها يوكاوا. ونعرف الآن أن الميون ليس كالبيون، ولكنه في الأساس يشبه الإلكترون ما عدا أنه أثقل من الإلكترون بقرابة ٢٠٠ مرة. وكان اكتشاف الميون والبيون هو مجرد البداية. وبمساعدة المتسارعات الجديدة والأكثر مقدرة تم اكتشاف أنواع أكثر من الجسيمات. وبحلول عام ١٩٥٧ عُرف ثمانية عشر جسيمًا أوليًّا، بينها جسيمات لها أسماء مثل سيجما ولامدا، Xi وK ميزون (راجع الجدول ٨-١). وطالت القائمة في أواخر خمسينات وستينيات القرن العشرين حتى إن تلك الجسيمات الجديدة أعطيت أرقامًا بدلًا من الأسماء، وأصبح معروفًا وجود أكثر من مائة جسيمة «أولية». ولقد أزال مثل هذا الانتشار الوصف البسيط الظاهري لقوالب البناء الأساسي للمادة المعروف في ثلاثينيات القرن العشرين. وانزعج الفيزيائيون عامة بذلك التجمع المعقد الظاهر للجسيمات الأساسية. والفكرة الإغريقية التي تقول أن البسيط جميل استمرت تسود الفكر العلمي.

جدول ٨-١: الجسيمات الأساسية (حوالي ١٩٥٧).

العائلة	الجسيمة	الرمز	الشحنة	الدوران المغزلي	الكتلة Mev	معدل العمر (ثانية)
الفوتون	فوتون	γ	٠	١	٠	ثابت
ليبتون	إلكترون	e^-	١–	٢/١	٠,٥١١	ثابت
	ميون	μ^-	١–	٢/١	١٠٥,٧	٢,٢ × $١٠^{-٦}$
	إلكترون نيوترينو	ν_e	٠	٢/١	٠؟	ثابت
	ميون نيوترينو	ν_μ	٠	٢/١	٠؟	ثابت
ميزون	بيون مشحون	π^+	١	٠	١٣٩,٦	٢,٦ × $١٠^{-٨}$
	بيون متعادل	π^0	٠	٠	١٣٥,٠	٠,٨ × $١٠^{-١٦}$
	كاون مشحون	K^+	١	٠	٤٩٣,٨	١,٢ × $١٠^{-٨}$
	كاون متعادل	K^0	٠	٠	٤٩٧,٧	٠,٩ × $١٠^{-١٠}$ أو ٥,٢ × $١٠^{-٨}$
	eta	η	٠	٠	٥٤٨,٧	~٢ × $١٠^{-١٩}$
باريونات	بروتون	p	١	٢/١	٩٣٨,٣	ثابت
	نيوترون	n	٠	٢/١	٩٣٩,٦	٩١٧
	لامدا	Λ	٠	٢/١	١١٥,٤	٢,٦ × $١٠^{-١٠}$
	سيجما$^+$	Σ^+	١	٢/١	١١٨٩,٤	٧,٩ × $١٠^{-١١}$
	سيجما^0	Σ^0	٠	٢/١	١١٩٢,٣	٥,٨ × $١٠^{-٢٠}$
	سيجما$^-$	Σ^-	١–	٢/١	١١٩٧,٢	١,٥ × $١٠^{-١٠}$
	Xi متعادل	Ξ^0	٠	٢/١	١٣١٤,٣	٢,٩ × $١٠^{-١٠}$
	Xi سالب	Ξ^-	١–	٢/١	١٣٢٠,٨	١,٦ × $١٠^{-١٠}$

وحتى قبل أن تبدأ الجسيمات تحت النووية في التراكم بسرعة، أقر الفيزيائيون النوويون أن الجسيمات المختلفة تقع طبيعيًا في مجموعات قليلة مختلفة أو «عائلات» وفقًا لخصائص كل منها. حاول الفيزيائيون تقدير الكتلة والشحنة الكهربية، والدوران المغزلي (عدد كمي يصف كمية حركتها الزاوية الجوهرية) وبعض الصفات الأخرى التي سيتم شرحها لاحقًا لكل جسيمة. ثم فُرض أن تقع الجسيمات في عائلات تمتلك أفرادها خواصًا متشابهة. ومثال لذلك، الجسيمات «الأولية» الثماني عشرة المعروفة

سنة ١٩٥٧ والمدونة في الجدول ٨-١ ومقسمة إلى أربع عائلات معروفة. الباريونات (baryons) جسيمات لها كتلة ساكنة (أي صحيحة) تساوي كتلة البروتون الساكن أو أكبر منها. (باريرون معناها «الجسيمة الثقيلة»). وهذه الجسيمات معروف عنها كلها أنها تتداخل مع بعضها عن طريق قوى نووية قوية (وأيضا قوى كهرومغناطيسية إذا كانت تحمل شحنة). ونلاحظ أنها جميعًا لها نصف عدد صحيح بالنسبة للدوران المغزلي كواحدة من خواصها المتأصلة. وفيما عدا البروتون فكل الباريونات ما عدا البروتونات معروف عنها أنها غير مستقرة وأنها تتحلل تلقائيًّا عادة (تتحلل إلى جسيمات أخرى) في أجزاء صغيرة من الثانية. ويشير العمر القصير إلى حقيقة أن الجسيمة ستتواجد فترة قصيرة فقط بعد تخليقها في التفاعل النووي. وعندما تتحلل، فإنها تتحول إلى جسيمة أو أكثر لها عمر أطول وتلك بدورها تتحلل إلى أن تصل فقط إلى جسيمة مستقرة (مثل بروتون أو نيوترون). (وحتى النيوترون عندما يتم عزله، سيتحلل تلقائيًّا بمتوسط عمر حوالي خمس عشرة دقيقة، ويحاول الفيزيائيون الآن أن يحددوا هل البروتون مستقر تمامًا بالفعل — أي أن له عمرًا لا نهائيًّا.)

والميزونات جسيمات لها كتلة سكون أقل من الباريونات لكنها أكبر من اللبتونات، من العائلة التالية. ولكل هذه الجسيمات دوران مغزلي جوهري قيمته صفر أو عدد صحيح. ويوجد بجانب كل من الباي ميزون المتعادل والمشحون (الجسيمات التي تنبأ بها يوكاوا) K-ميزون المتعادل والمشحون أو كاون Kaon. لاحظ أن كل الميزونات غير مستقرة، ولها عمر يتميز بكونه جزءًا صغيرًا من الثانية.

وللبتونات كتلة ساكنة أقل من كتلة الميزونات، ولها دوران مغزلي نصف عدد صحيح. (كلمة لبتون معناها «جسيمة خفيفة»، وميزون تعني «جسيمة متوسطة».) تتكون هذه العائلة من الإلكترون والميون، الذي يعمل وكأنه مجرد إلكترون ثقيل. وترتبط النيترونات بإلكترون أو ميون، ولها كتل سكون إما تساوي صفرًا أو على الأغلب صغيرة جدًّا تقترب من الصفر.

والفوتون هو كم الإشعاع الكهرومغناطيسي وهو في عائلة له وحده. وله دوران مغزلي يساوي واحد (ومن المحتمل) أن كتلة سكونه تساوي صفرًا.

وبجانب الجسيمات المدونة في الجدول ٨-١ يوجد لكل جسيمة (أو يعتقد) جسيمة مضادة. وللجسيمة المضادة نفس كتلة السكون، والدوران المغزلي الجوهري وعمر مثل الجسيمة المصاحبة. إلا أن لها شحنة كهربية مضادة بالضبط، وخصائص أخرى معينة لم تتم مناقشتها بعد. فمثلًا تسمى الجسيمة المضادة للإلكترون

بالبوزيترون، وقد تم اكتشافه سنة ١٩٣٢. وتسمى الجسيمة المضادة للبروتون بالبروتون المضاد وقد شوهد أول مرة سنة ١٩٥٥. ويعتقد أن بعض الجسيمات مثل البيون المتعادل (t°) والفوتون هي نفسها جسيماتها المضادة. وعندما تتصادم الجسيمة وجسيمتها المضادة، سيدمر كل منهما الآخر وتنتج جسيمة جديدة أو طاقة كهرومغناطيسية (فوتونات) أو الاثنين معًا. وإذا اعتبرنا الجسيمات المضادة منفصلة فإن قائمة الجسيمات تحت النووية في الجدول ٨-١ تشير فعليًّا إلى عدد اثنين وثلاثين جسيمة (خمسة عشر جسيمة ومضاداتها علاوة على t° والفوتون).

قد لا تعتبر قائمة الجسيمات في الجدول ٨-١ طويلة أكثر من اللازم ومعقدة، خاصة عند تنظيمها في مجموعات كما هو موضح. ولكن لسوء الحظ، بدأت القائمة تنمو بسرعة في أواخر خمسينيات وخلال ستينات القرن العشرين. وأخذت جسيمات تحت نووية جديدة تظهر وتنتشر في العائلة المميزة للباريونات. حيث اكتشفت جسيمات أكثر وأكثر لها كتلة سكون أكبر وزمن تحلل أقصر. وأصبح عمر هذه «الجسيمات» الجديدة من القصر حتى إن العلماء بدءوا تسميتها بالرنين، الذي يعني مباشرة أنهم غير متأكدين الآن أن كوانتات الطاقة الجديدة هذه هي جسيمات فعلًا. وتوقف فيزيائيو الجسيمات الأولية عن محاولة إيجاد أسماء لتلك الباريونات الجديدة وعرفوها ببساطة حسب طاقة كتلتها الساكنة. وأصبح الموقف المعقد إلى حد ما للجدول ٨-١ أكثر تعقيدًا ومربكًا بقدر واضح. وسنكرس بقية هذا الفصل لمناقشة كيف إن انتشار هذه الجسيمات الجديدة تم فهمه أخيرًا بمدلول بنية تحتية أبسط بواسطة دراسة قوانين الحفاظ وتماثلاتها الوثيقة.

قوانين الحفاظ والثبات

اعترف الفيزيائيون بأهمية قوانين الحفاظ منذ حوالي ثلاثة قرون. وقد عرض نيوتن قانونه للحفاظ على الكتلة وكمية الحركة في كتابه برينكيبيا في سنة ١٦٨٧. وكان تطور قانون الحفاظ على الطاقة من أعظم الإنجازات الهامة في الفيزياء في القرن التاسع عشر (الفصل الرابع). وسرعان ما أيقن الفيزيائيون النوويون أثناء دراستهم للتفاعلات النووية في تجارب دقيقة بعناية أن الكميات المختلفة العديدة كانت دائمًا محفوظة. كان بعض من تلك معروفًا من قبل بأنها كميات محفوظة، مثل: الطاقة، وكمية الحركة، والشحنة الكهربية، وكمية الحركة الزاوية. ولكن في النهاية كانت

هناك كميات جديدة تم اكتشافها ويجب الحفاظ عليها، وتوقع الفيزيائيون أن الدراسة المتأنية لهذه الكميات قد تقود إلى فهم أفضل للقوة النووية الغامضة.

واسترجاع ذلك الحفاظ لكمية ما يعني ببساطة أنها تظل ثابتة المقدار ككل. ويستطيع الفيزيائيون النوويون أن يحضروا بعناية تفاعلًا نوويًّا حتى إنهم يعرفون بالضبط مقدار الكتلة الكلية، والطاقة والشحنة الكهربية، وكمية الحركة ... إلخ، كل ذلك متاح قبل إجراء التفاعل. وباستخدام أجهزة متخصصة، يستطيعون أن يحسبوا قيمة نفس هذه الكميات بعد إجراء التفاعل. والمقارنة الدقيقة للمقادير المعروفة لكل كمية قبل وبعد التفاعل النووي تكشف أن الكميات ثابتة (لم تتغير). ولقد اكتُشف في مثل هذه الدراسات أن التفاعلات النووية المحكومة بالقوى النووية القوية تخضع لقوانين الحفاظ أكثر من خضوعها لتداخلات الجاذبية والكهرومغناطيسية.

في أي تداخلات (سواء بين اثنين من كرات البلياردو أو بين جسيمتين تحت نوويتين) فإن الكميات السبعة التالية يتم الحفاظ عليها دائمًا:

(١) الكتلة-الطاقة.
(٢) كمية الحركة-الزخم.
(٣) كمية الحركة الزاوية.
(٤) الشحنة الكهربية.
(٥) العدد العائلي الإلكتروني.
(٦) العدد العائلي الميوني.
(٧) العدد العائلي البريوني.

عند التعامل مع الكميات الثلاثة الأخيرة، يمكن اعتبار أن الجسيمة +١ والجسيمة المضادة -١. وهكذا فإن تلك القوانين الثلاثة تقول إن الزيادة الكلية للجسيمات على الجسيمات المضادة (والعكس) داخل كل عائلة يحافظ عليها دائمًا بالضبط، وأكثر من ذلك تشير إلى أن «العائلات» هي بطريقة ما تقسيم طبيعي. الكميات الأربعة الأولى المحافظ عليها معروفة لأكثر من ثمانين عامًا (بعضها أكثر بكثير) وقد تم مناقشتها من قبل في هذا الكتاب. وهذه الكميات السبعة الأساسية يحافظ عليها على مدى علمنا بواسطة قوى الطبيعة الأربعة الأساسية. ودعنا الآن نأخذ كل قوة أساسية بمفردها آخذين في الاعتبار خضوع القوى لقوانين الحفاظ.

في أي تفاعل تسود فيه القوة النووية القوية (وهذا هو الحال في معظم التفاعلات النووية) فبجانب الكميات السبعة الأساسية المذكورة سابقًا هناك أيضًا كميات معروفة

مثل التكافؤ الوظيفي، والدوران المغزلي النظائري، والغرابة أيضًا يتم الحفاظ عليها. ويتضمن التكافؤ الوظيفي لأي نظام لولبيته أو «اليدوية» المتأصلة إلى اليمين، أو اليسار. فمثلًا القلاووظ اليميني الاتجاه يكون له لولبية يمينية الاتجاه، والقلاووظ يساري الاتجاه تكون لولبيته يسارية الاتجاه. وبالنسبة للجسيمات النووية تتعامل اللولبية مع توجه متجه الدوران المغزلي الجوهري للجسيمة بالنسبة لسرعة المتجه (اتجاه التحرك). والدوران المغزلي النظائري كمية ميكانيكية كوانتية تصف النيوترون أو البروتون الزائد في نظام نووي. والغرابة هي مقدار ميكانيكي كوانتي وليس له وصف بسيط وسنقوم بشرحه فيما بعد. ويرتبط بتلك الكميات المحفوظة حقيقة أن التفاعلات النووية هي أيضًا تتم ملاحظتها لتخضع «لعملية» تعرف بتوحيد الشحنة. وتعني المقولة الأخيرة ببساطة أنه بالنسبة لأي تفاعل نووي محتمل هناك تفاعل آخر محتمل، يقابل تغير كل الشحنات الموجبة إلى شحنات سالبة، وكل الشحنات السالبة إلى شحنات موجبة (في الواقع، تتبادل كل الجسيمات مع جسيماتها المضادة). بعض من هذه الكميات الجديدة، مثل الدوران المغزلي للنظائر والغرابة، لم تكن جديرة بالإشارة إذا لم تكن محفوظة في التفاعلات النووية. ولأنها محفوظة يجب أن نعتبرها مفاتيح للخصائص الأساسية للجسيمات تحت النووية.

وتأتي القوة الكهرومغناطيسية في المرتبة الثانية بعد القوة النووية القوية من حيث الشدة، والتداخلات التي تسودها القوة الكهرومغناطيسية تبدو محفوظة بنفس القدر مثل القوى النووية القوية، ما عدا في حالة الدوران المغزلي للنظائر. وكون الدوران المغزلي للنظائر غير محفوظ بالقوة الكهرومغناطيسية يعود إلى حقيقة أن الدوران المغزلي يتضمن بروتون أو نيترون زائد، أي الجسيمات الزائدة سواء مشحونة أو غير مشحونة. ولأن القوة المغناطيسية تعتمد بصفة رئيسية على ما إذا كان الجسم مشحونًا أم لا، فهي ليست حساسة بشكل كبير للنيوترون أو البروتون الزائد بل بالأحرى فقط لعدد الجسيمات المشحونة.

وتخضع القوة النووية الضعيفة لقوانين الحفاظ الأساسية السبعة فقط. وعندما تبين سنة ١٩٥٧ أن هذه القوة لا تحافظ على التكافؤ الوظيفي كان الفيزيائيون مندهشين عمومًا، لأن مثل هذا الفشل يشير إلى أن العالم في الأساس ليس ذا وجهين. وتبدو هذه «اليدوية» المتأصلة غريبة، واعتبرت القوى النووية الضعيفة مبهمة إلى حد ما.

وختامًا، فإن قوة الجاذبية من الضعف حتى إنه لا يوجد تفاعل معروف بين الجسيمات تحت النووية تتسيده هذه القوة. وعليه ليس معروفًا لأي من قوانين الحفاظ تخضع قوة الجاذبية على المستوى الميكروسكوبي.

وقبل أن تنتهي هذه المناقشة الموجزة عن قوانين الحفاظ المعروفة من المهم أن نتذكر تضمينات قوانين الحفاظ. وبمجرد إقرار قانون للطبيعة معناه اكتشافنا لحقيقة عن الطبيعة. وقانون الطبيعة يجب أن يطاع (إذا كان صحيحًا)، فليس هناك خيار. والقانون المدني يقول إن المرء يجب أن يتبع إشارة المرور التي تقول قف ويمكن أن يتجاهلها (فإذا تجاهلها ربما يتبع ذلك بعض التداعيات غير المستحبة). وقانون الطبيعة مقيد لكيفية إمكانية تطور النظام الفيزيائي. فمثلًا، عندما نعلم أن الرقم البريوني محفوظ، فتلقائيًّا نجنب تمامًا عددًا كبيرًا من التفاعلات النووية التي قد لا تحافظ على هذه الكمية. وعندما يمر الوقت الذي نستغرقه في جمع قيود الحفاظ على أعضاء العائلة الآخرين والشحنة والتكافؤ الوظيفي وهكذا، كثيرًا ما نستطيع أن نتنبأ بأن عددًا قليلًا من التفاعلات النووية يمكن حدوثها لمجموعة معينة مين ظروف البداية. فإذا تمت مشاهدة أي من التفاعلات الأخرى تجريبيًّا، فإن واحدًا من قوانينا المفترضة للحفاظ يكون خطأ.

لقد سار تاريخ دراسة الجسيمات تحت النووية بالفعل في الاتجاه المعاكس تمامًا. وبالرغم من أن عددًا أكثر وأكثر من الجسيمات تحت النووية قد تم اكتشافه فإن معظم التفاعلات الممكنة والمتوقعة بين هذه الجسيمات لم تحدث. ولكي تفسر لماذا مُنعت تلك التفاعلات، لا بد من ابتكار قوانين حفاظ جديدة. وما حدث أن بعضًا من تلك الكميات المكتشفة حديثًا مثل الدوران المغزلي للنظائر والغرابة قد أدت في النهاية إلى فهم جديد لقوالب البناء الأساسية للطبيعة.

قوانين الحفاظ والتماثلات

أدت القوانين الجديدة للحفاظ إلى فهم جديد للقوالب الأساسية لبناء الطبيعة بسبب التماثلات التي تعنيها قوانين الحفاظ تلك. والتماثلات في الطبيعة شيء نألفه جميعًا. وكثير من الأشياء الطبيعية جانبها اليساري يشبه تمامًا الجانب الأيمن، أو القمة تطابق القاع. كثير من الزهور والبلورات ورقائق الثلج وحتى وجوه البشر إما متماثلة تمامًا أو قريبة من التماثل. ونعني بالتماثل، في هذا الشأن، أن هناك بعض الدوران يمكن أن يحدث للشيء وتكون النتيجة أنه يبدو بعد الدوران كما كان في الأصل



شكل ٨-١: رقائق الجليد بزاوية تماثل ٦٠ درجة (ريتشارد هولت، صور الباحثين).

تمامًا (أو تقريبًا). (كان الاهتمام بالتماثل هذا في صلب أبحاث الإغريق القدامى عبر البحث عن الكمال في السماوات كما في المناقشة في الفصل الثاني.) وفيما يخص إحساسنا العادي بالتماثل فنحن نعني تماثل المرآة، الذي يحدث فيه تبادل جوانب اليمين واليسار. إلا أنه، يمكن أن تكون رقائق الثلج متماثلة عبر عديد من مراحل الدوران المختلفة مثل ٦٠، ١٢٠، ١٨٠ درجة وهكذا. ويبين شكل ٨-١ تماثلًا كبيرًا لرقائق الثلج الذي سيبدو تمامًا عندما يتم تدويره بأي زاوية من مضاعفات ٦٠ درجة.

ولقد عمم الفيزيائيون فهمنا العام للتماثل بالقول إن عملية التماثل هي أي حدث متميز تمامًا حيث يترك الشيء كما كان في البداية عند حدوثه. ولا بد من التعبير عن عمليات التماثل الفيزيائية بعمليات رياضية. فمثلًا عمليات التماثل التي ناقشناها لرقائق الثلج دورانية. والتحقق بأن قوانين الفيزياء الأساسية لم تتغير بواسطة كثير من تلك العمليات التي تدعى عمليات التماثل هو من الأهمية بالنسبة لموضوعنا هنا. فمثلًا، لا يتغير أي من قوانين الفيزياء في نظام مغلق إذا تعرض النظام كله للدوران بأي زاوية اختيارية. وبالمثل لا تتغير قوانين الفيزياء إذا نُقل

نظام مغلق في الفضاء (شريطة أن كل الأشياء التي لها علاقة به نقلت معه)، أو إذا أزيح النظام في الزمان. وهناك ثلاثة أمثله لعمليات التماثل يمكن إجراؤها.

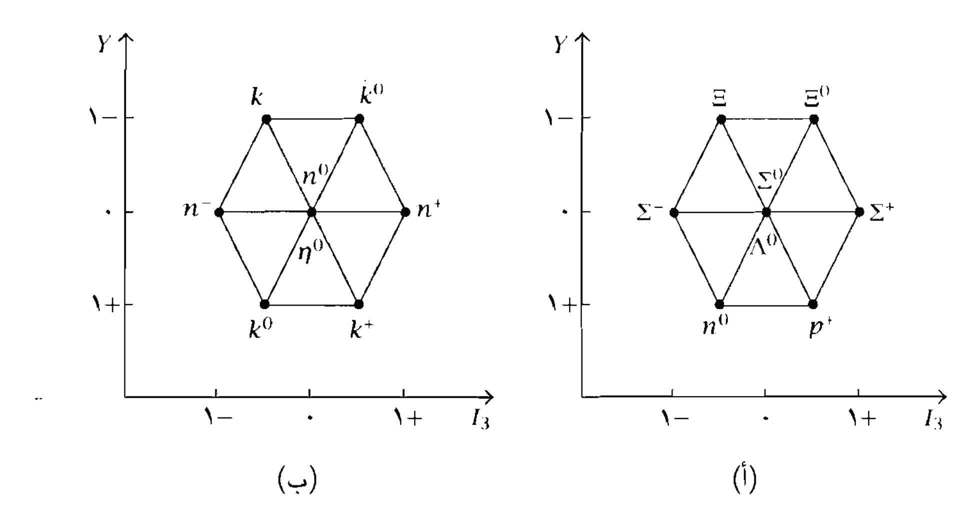
يبدو أن أمثلة عمليات التماثل الثلاثة المذكورة سابقًا التي لا تغير قوانين الفيزياء متواضعة، وإلى حد ما هي كذلك. إننا لا نتوقع أن العلماء في الصين سيكتشفون أن قوانينهم في الفيزياء تختلف عن قوانيننا، أو أن العلماء بعد مائة سنة من الآن سيجدون قوانين مختلفة للفيزياء تتحكم في العالم. وعلى كل، فكل واحدة من عمليات التماثل المتواضعة تلك تعبر عن واحد من القوانين المعروفة للحفاظ. وباستخدام تحليل رياضي بسيط، يمكن في الحقيقة إظهار أن قوانين الفيزياء لا تتغير بالانتقال في الفضاء (تغير الموقع) الأمر الذي يقابل قانون الحفاظ على كمية الحركة. وكلمة يقابل هنا تعني أن أحدهما يعني بالضرورة الآخر. وحقيقة أن قوانين الفيزياء لا تتغير بالانتقال في الزمن تماثل قانون الحفاظ على الطاقة. وكون القوانين لا تتغير بالدوران تماثل قانون الحفاظ على كمية الحركة الزاوية.

والعلاقة بين عمليات التماثل وقوانين الحفاظ لا تنتهي بهذه العمليات التماثلية الثلاثة «المتواضعة». وارتباط كل الثلاثة (المكان والزمان والدوران) يشير إلى مبدأ النسبية لأينشتاين، ويعرف أحيانًا بثبات لورنتز. وحقيقة أن قوانين الفيزياء لا تتغير بتغير الطور في معامل موجة ميكانيكا الكم (راجع الفصل السابع) تطابق قانون الحفاظ على الشحنة الكهربية. وعمليات التماثل التي تطابق قوانين الحفاظ الأخرى المعروفة معلومة لكنها عمليات في الصيغ الرياضية لميكانيكا الكم بشكل رئيسي.

ويعمل التوافق بين العملية التماثلية وقانون الحفاظ في الاتجاهين، كل منهما يوحي بالآخر. ويجعل هذا التوافق العلاقات في منتهى الأهمية. فكل قانون حفاظ جديد يعني «عددًا كميًّا» وعملية تماثل، وما زالت قوانين الفيزياء لا تتغير. وفي كل اكتشاف جديد لكمية محفوظة قد يُسْتنتج تماثل جديد في قوانين الفيزياء. إن مثل هذه العلاقة بالضبط هي التي مكنت جيل-مان ونييمان من اكتشاف التماثل الجديد الموحي بقوانين حفاظ معروفة للتفاعلات النووية، متضمنة المكتشف حديثًا في ذلك الوقت وهي الكمية المحفوظة المسماة الغرابة.

نموذج الكوارك

والآن وقد ناقشنا العلاقة الهامة بين قوانين الحفاظ والتماثلات المتضمنة، نستطيع أن نرى كيف أن اكتشاف كميات مصانة جديدة قد أدى إلى نموذج جديد للقوالب



شكل ٨-٢: أشكال التقسيم. (أ) الدوران المغزلي ١ / ٢ للبريونات. (ب) الدوران المغزلي صفر للميزونات. Y الشحنة الزائدة. I_3 مكون-Z للدوران المغزلي النظائري.

الأساسية لبناء الطبيعة. بدأ هذا النموذج الجديد عندما أقر كلٌّ من جيل-مان ونييمان كل بمفرده أنه إذا كانت البريونات والميزونات (اثنان من عائلات الجسيمات التي نوقشت سابقًا) قد رُتِّبت على أساس غرابتها ودورانها المغزلي للنظائر والأعداد الكمية، لنتج عن ذلك أنماط بسيطة. ولنتذكر أن الغرابة هي عدد كمي تم إدخاله ليفسر لماذا كثير من التفاعلات المتوقعة بين الجسيمات المعروفة كانت تشاهد بصورة متقطعة نسبيًّا، وأن الدوران المغزلي للنظائر يصف حالات الشحنة المختلفة التي يمكن للجسيمات المتداخلة بشدة أن تحصل عليها.

ويمكن رؤية هذه الأنماط البسيطة بسهولة كبيرة إذا استخدمنا كمية جديدة Y تسمى الشحنة الزائدة، وتعرف كما يلي:

$$Y = S + B$$

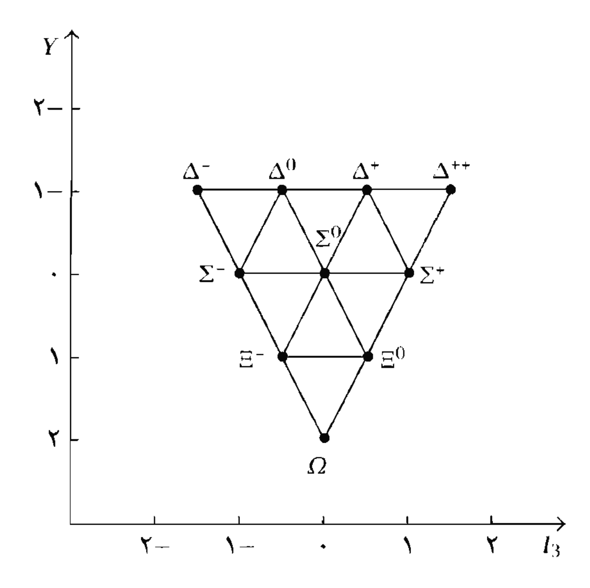
حيث S عدد كم الغرابة، B العدد البريوني. ويبين الشكل ٨-٢ الأنماط البسيطة التي تم الحصول عليها للبريون بدوران مغزلي جوهري ١ /٢ وللميزون دوران مغزلي جوهري صفر. ويتحدد موقع كل جسيمة عن طريق قيمة عددها الكمي لشحنتها الزائدة Y وعدد دورانه المغزلي النظائري I_3 (في الواقع ما يدعى مكون-Z للعدد الكمي للدوران المغزلي النظائري).

ويتحدد موقع كل جسيمة بتفرد. وتعود الرموز Λ، Σ وهكذا إلى الجسيمات المدونة بالجدول ٨-١. لاحظ أن تقسيم البريون يتضمن النيوترون والبروتون المعروفين تمامًا علاوة على بعض الجسيمات «الأغرب» الأحدث.

يتضمن تقسيم الميزون الباي ميزون التي تنبأ بها في البداية يوكاوا، علاوة على بعض الميزونات المكتشفة حديثًا. وكلا هذين النمطين سداسي الشكل، ولكل منهما ثمانية أعضاء (اثنان في المنتصف). أشار جيل-مان إلى هذه التقسيمات على أنها طريقة الثماني طيات. والمبدأ المهم هنا ليس ما هي الشحنة الزائدة أو الدوران المغزلي النظائري، ولكن باستخدامهم يمكن الحصول على أنماط بسيطة. وبنفس القدر من الأهمية فإن هذه الأعداد الكمية قد «ابتُكرت» (أو اكتُشفت) حتى يمكن الحصول على قوانين الحفاظ المطلوبة، التي قد تفسر لماذا تتم بعض التفاعلات النووية بينما لا يتم البعض الآخر.

وفي الفيزياء، كثيرًا ما يقال إن الاختبار الحقيقي لأي نموذج جديد أو نظرية جديدة هو هل تستطيع التنبؤ بطريقة صحيحة بشيء ما جديد. وبالرغم من أن طريقة جيل-مان ونييمان الجديدة لتقسيم الجسيمات تؤدي بوضوح إلى بعض الأنماط البسيطة، فإنه إذا لم تؤدِ تقسيماتهم إلى بعض من المعرفة الجديدة التي لم تعرف من قبل، فإنها ستكون مجرد مخطط مثيرة. والجدير بالإشارة أن مخطط التقسيم الجديد هذا قد قدم لحظيًّا التنبؤ بجسيمة جديدة لم تشاهد تجريبيًّا من قبل مطلقًا. يوضح شكل ٨-٣ رسمًا للبريونات بدورانها المغزلي المتأصل ٣/٢ المشابه للرسم في شكل ٨-٢. كل الجسيمات الممثلة في الرسم معروفة ما عدا جسيمة تدعى Ω^- أوميجا السالبة (Omega minus) المبينة أسفل الشكل. ونمط (أو التماثل) الشكل واضح، إنه مثلث مقلوب. وببساطة يستطيع جيل-مان، عن طريق موضعها في الشكل، أن يتنبأ بالشحنة الزائدة (ومن ثم الغرابة والدوران المغزلي النظائري للجسيمة الجديدة). ومكنت اعتبارات أخرى بعد ذلك جيل-مان من تقدير شحنة Ω^- وكتلتها أيضًا.

ومكّن الحصول على الخواص المتوقعة لهذه الجسيمة الجديدة الفيزيائيين التجريبيين بالمعمل القومي بروكهافن في لونج أيلاند، نيويورك من العمل فورًا لاكتشاف هل فعلًا هذه الجسيمة الجديدة Ω^- موجودة. وكانت الخطة العامة هي اختيار دراسة تفاعل واحد على الأقل يؤدي إلى إنتاج Ω^- بينما ما زال الخضوع لقوانين الحفاظ ساريًا. فإذا تم تخليق Ω^- عندئذ يمكن للتجريبيين أن يميزوها



شكل ٨-٣: شكل التقسيم العشري للبريونات. Y الشحنة الزائدة، I_3 مكون-Z الدوران المغزلي النظائري.

بكتلتها وشحنتها ودورانها المغزلي والمزايا الكمية الأخرى. وقد تم اختيار التفاعل المناسب بعد التحقق من الأهمية الأساسية للمخطط التقسيمي الجديد، وتم اكتشاف الجسيمة Ω^- تجريبيًّا في نوفمبر ١٩٦٤ أي سبعة شهور فقط بعد التنبؤ بوجودها.

بين الاكتشاف التجريبي لجسيمات Ω^- بوضوح أن هناك أهمية أساسية للمخطط التقسيمي الجديد. كما بين جيل-مان سنة ١٩٦٣ أن تجميع الجسيمات وفقًا لأنماطها في رسم الشحنة الزائدة أمام الدوران المغزلي النظائري قد تم وصفه بدقة عن طريق فرع للرياضيات يدعى نظرية المجموعة (group theory) (ليس غريبًا؛ لأن الجسيمات كانت منفصلة في مجاميع). ولقد وصفت تلك المجاميع المختلفة، بصفة خاصة، عن طريق تمثيل رياضي معروف على شكل $SU(3)$. ومرة ثانية، ليس من المهم أن نشرح رياضيات $SU(3)$ هنا إلا أن نعرف أنها تصف المجاميع التي تكون فقط اتحادات من ثلاثة أشياء مختلفة أساسًا.

وهكذا افترض جيل-مان (وفيزيائي آخر، هو جورج زويج) أن البريونات والميزونات المعروفة (العائلات التي وصفها التقسيم الجديد) تتكون من ثلاث جسيمات أساسية، وربما أكثر من ذلك.

وسمى جيل-مان تلك الجسيمات الجديدة كواركات (من جزء بسيط في رواية لجيمس جويس عزاء فينيجان). ولأن الانتشار العظيم للجسيمات تحت النووية كان

موجودًا بالفعل لعائلات البريونات والميزونات، وإذا كانت فرضية جيل-مان، ناجحة فإن ذلك سيؤدي إلى تبسيط هائل في قائمة الجسيمات الأساسية.

ولذا استنتج جيل-مان أن كلًّا من الكواركات الثلاثة لا بد أن تتحد بها خصائص مثل الكتلة والشحنة الكهربية والدوران المغزلي وخلافه لوصف الخصائص المعروفة للبريونات والميزونات. وبدت بعض خصائص تلك الكواركات غريبة، وخاصة الحاجة أن يكون لديها شحنة وأن تكون إما ثلث أو ثلثي شحنة الإلكترون أو البروتون. لقد كان من المعروف لسنوات عديدة أن شحنة الإلكترون هي أصغر وحدة للشحنة الكهربية. وجد جيل-مان أن البريونات لا بد أنها تتكون من ثلاثة كواركات، والميزونات من كواركين. ويقابل كل من هذه الكواركات الثلاثة كواركات مضادة لها نفس العلاقة مع كواركاتها مثل الجسيمات المضادة الأخرى بالنسبة للجسيمات (مثل شحنة مضادة، ونفس الكتلة، وخلافه، كما شرحنا من قبل). والميزون فعلًا عبارة عن كوارك وكوارك مضاد. وكل مجاميع البريونات والميزونات المعروفة (في مخطط التقسيم الجديد) تم التحقق منها على أساس نموذج الكوارك. وحتى وجود جسيمات Ω^{-} قد تم التنبؤ بها بشكل صحيح بواسطة نموذج الكوارك.

كان النجاح الواضح والتداعيات البسيطة الناتجة من نموذج الكوارك عظيمة بما فيه الكفاية حتى إن كثيرًا من التجريبيين بدءوا توًّا في الكشف عن الكوارك تجريبيًّا. كان كثير من الفيزيائيين مرتابين، شأن كل نجاح، لأنه لم يعرف أبدًا عن رؤية جسيمة لها جزء من الشحنة وأن الكواركات الثلاثة المتنبأ بها جزء من الشحنة (إما ثلث أو ثلثي شحنة الإلكترون). وحتى اليوم لا توجد تجربة مقنعة استطاعت اكتشاف كوارك مفرد أو أن يشاهد كوارك حرٌّ تجريبيًّا. ولتعقيد الموقف أكثر بينت الاكتشافات الحديثة لجسيمات تحت نووية ذات كتلة أكبر أن الكوركات الثلاثة الأصلية يجب أن تتسع لتتضمن كواركًا رابعًا وخامسًا وسادسًا. ولن يمثل نموذج الكوارك مثل هذا التبسيط إذا كان مطلوب كواركات كثيرة.

وبالرغم من فشل إمكانية التعرف على كوارك منفرد والزيادة الحديثة في عدد الكواركات المطلوبة، فإن معظم الفيزيائيين النوويين مقتنعون اليوم أن نموذج الكوارك صحيح في الأساس. وفي الواقع، فإن الحاجة لإضافة المزيد من الكواركات الجديدة تقدم بعض الأدلة القوية على صحة النموذج. فعندما تُكتشف جسيمة جديدة تتطلب كواركًا جديدًا حتى يمكن وصف خصائصه بطريقة صحيحة، فمن الممكن للمرء توًّا التنبؤ بجسيمات جديدة قد تماثل الاتحادات الأخرى للكوارك الجديد مع

الكواركات «القديمة». لقد تم اكتشاف تلك الجسيمات الجديدة تجريبيًّا، بتناغم أكثر، محققًا وجود الكوارك الجديد وصحة نموذج الكوارك ككل.

وبجدول ٨-٢ خواص الكواركات الستة المعروفة. وسميت كواركات جيل-مان الأصلية عادة: فوق وتحت وغريب. ويمكن أن تفسر كل البريونات والميزونات للجسيمات الأولية «الأصلية» الاثنين والثلاثين في الجدول ٨-١. فالبروتون مثلًا يعتقد أنه يتكون من اثنين من الكواركات فوق وكوارك تحت، ويتكون النيترون من واحد فوق واثنين تحت، والشحنة الموجبة لباي ميزون يوكاوا عبارة عن واحد كوارك فوق وواحد كوارك تحت مضاد.

وتطلب اكتشاف جسيمة جديدة، لها متوسط عمر طويل نسبيًّا تعرف بالجسيمة J أو Ψ (Psi) في سنة ١٩٧٤ إدخال كوارك رابع يسمى عادة بالكوارك المسحور. واكتشاف جسيمة أخرى ذات عمر طويل نسبيًّا أيضًا سنة ١٩٧٧ رمز له بالرمز Υ (إبسيلون) وأطلق عليه الكوارك القاع (أو الجمال). وأشارت تجارب أجريت سنة ١٩٨٣ إلى وجود كوارك سادس أطلق عليه الكوارك القمة (أو الحقيقة). وبجانب تلك الأنواع الستة من الكواركات (أو المذاق كما يطلق عليهم غالبًا)، فإن كل كوارك يمكن أن يتواجد في ثلاثة ألوان مختلفة، يتم اختيارهم عادة الأحمر، الأصفر والأزرق. وهناك أيضًا لكل كوارك كوارك مضاد، كما ناقشنا من قبل: وعليه فهناك ستة وثلاثون كواركًا مختلفًا، لكن تتبع فقط ستة أنواع أساسية، (بينما يبدو أن استخدام كلمات مثل: الغرابة، والسحر، واللون، وفوق، وتحت ... وهكذا؛ أمر شاذ وغريب لوصف مقادير فيزيائية، إلا أنها مشروعة، بالضبط مثل صياغة كلمات إغريقية جديدة كالإنتروبيا والإنثالبيا وغيرهما).

وإذا كانت الكواركات هي فعلًا القوالب الأساسية لبناء البريونات والميزونات، فلا بد من وجود قوة جديدة، لم تذكر بعد، تربط ما بين الكواركات داخل البريون أو الميزون. ولا بد أن تكون هذه القوة قوية جدًّا لتفسير لماذا لا نشاهد أبدًا كواركًا حرًّا. وإدخال مفهوم اللون للكواركات كان لمحاولة تفسير هذه القوة الجديدة. ويعتقد أن القوة القوية جدًّا بين الكواركات موجودة بين الكواركات المختلفة اللون (أو بين كوارك ملون ومضاده). ويفهم أن قوة اللون هذه تشبه إلى حد ما القوة الكهربية الموجودة، كقوة تجاذب بين الشحنات المتضادة الإشارة. ويمكن فهم مجال القوة الكهربية على أنها صادرة من شحنة موجبة ومنتهية عند شحنة سالبة (أو العكس) كما يوضح ذلك شكل ٨-٤. ويمكن للقوة الكهربية بينهما أن تربطهما معًا. وبالمثل،

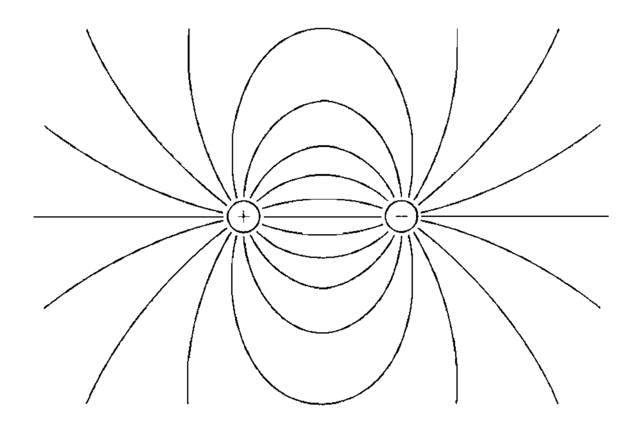
جدول ٨-٢: خصائص الكواركات.

الاسم	الدوران المغزلي	الشحنة الكهربية	العدد البريوني
فوق	١/٢	+٢/٣	١/٣
تحت	١/٢	−١/٣	١/٣
مسحور	١/٢	+٢/٣	١/٣
غريب	١/٢	−١/٣	١/٣
(حقيقة) قمة	١/٢	+٢/٣	١/٣
(جمال) قاع	١/٢	−١/٣	١/٣

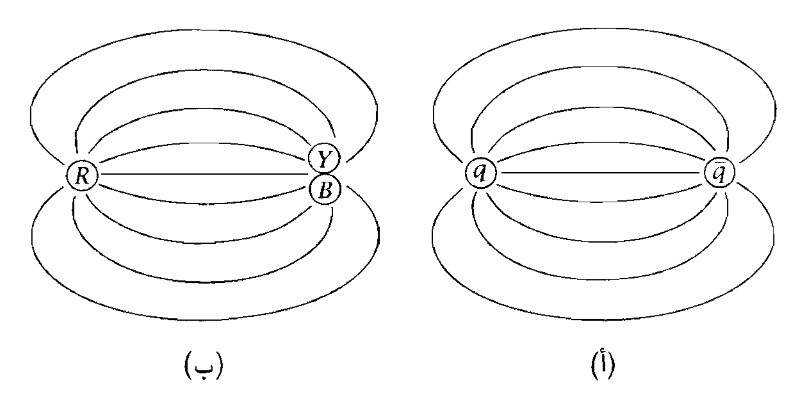
فقوة اللون بين الكواركات يعتقد أنها تنشأ عند كوارك له لون معين وتنتهي عند كواركين لهما اللونان الآخران، أو كوارك مضاد لنفس اللون. ويمكن للمرء أن يقول إن الكواركات تحس بقوة اللون تمامًا كالشحنة بالنسبة للقوة الكهربية. والشكل ٨-٥ يوضح مجال القوة-اللون للبريون والميزون.

فيما يخص الضوء العادي، من المعروف أن خلط كميات متساوية من الأحمر والأصفر والأزرق لا يعطي لونًا ملحوظًا (أبيض). وبالمثل فبريون مكون من واحد أحمر وواحد أصفر وواحد أزرق يكون محصلة الكوارك لا لون. وميزون مكون من كوارك وكوارك مضاد له نفس اللون، فيقال أيضًا إنه بلا لون (أي إن الكوارك المضاد له لون مضاد). والحقيقة المذهلة أن كل جسيمة تم اكتشافها حتى الآن واضح أنها مكونة من اتحاد كواركات ينتج عنها دائمًا اتحاد «لا لون له». ودائمًا يجد المرء ثلاث كواركات بها كل لون أو زوج من كوارك وكوارك مضاد. ويبدو أن الكواركات تأتي دائمًا إما ثلاثة أو زوج من كوارك وكوارك مضاد حتى نصل في النهاية إلى محصلة لا لون. وتتطلب قوة اللون ذلك ليمكنها أن تنتهي دائمًا داخل كل جسيمة.

وقوة اللون شديدة جدًّا، لأنه يبدو أن الكواركات مرتبطة بإحكام داخل الجسيمات، لدرجة أنه ليس من الممكن حتى الآن أن نجد كواركًا «حرًّا». وبالإضافة إلى ذلك من المعتقد أن قوة اللون بين الكواركات تزيد بدلًا من أن تقل عندما تنفصل الكواركات. وعلى النقيض فإن القوى الكهربية وقوى الجاذبية بين جسيمتين تصبح أضعف عندما تنفصل الجسيمات. وهكذا فإن قوة اللون هي قوة شاذة بمقارنتها بالقوة التي نألفها أكثر. فحقيقة أن قوة اللون تزداد عندما تنفصل الكواركات عن



شكل ٨-٤: خطوط مجال القوة الكهربية بين شحنتين.



شكل ٨-٥: خطوط مجال قوة اللون (أ) بين زوج الكواركات والكواركات المضادة في الميزون. (ب) بين ثلاثة كواركات في البريون. q كوارك، $\overline{q}$ كوارك مضاد، R كوارك أحمر، Y كوارك أصفر، B كوارك أزرق.

بعضها ربما تفسر لماذا ترتبط الكواركات مع بعضها بهذا الشكل القوي داخل الجسيمة ولم تُر إطلاقًا منفردة. ومن المعتقد أنه يمكن وصفها عن طريق نظرية المجال الكمي، حيث يطلق على تبادل الكوانتات الجليونات (gluons).

وأخيرًا وقبل أن ننهي مناقشتنا عن الكواركات وقوة اللون بينها، يجب أن نعيد تقديرنا للقوة النووية بين النوويات (النيوترونات والبروتونات). ويبدو أن القوة النووية القوية ليست قوة أساسية على الإطلاق. فالقوة بين النوويات هي مجرد نوع من التأثير المتبقي من قوة اللون الشديدة بين الكواركات داخل النوويات نفسها. إلا أنه ما زال مهما دراسة القوى النووية؛ لأن القوة النووية تحدد بنية النوويات

الموجودة داخل كل الذرات لكل المواد وهي مسئولة عن توليد الطاقة. ومع ذلك ولأن القوة النووية ناتجة بالفعل من قوة اللون، فإننا عندما نحاول فقط الاقتراب من دراسة القوة النووية من ذلك المنطلق نستطيع أن نأمل أن ننجح تمامًا في فهمها. ومن المحتمل أن يفسر ذلك لماذا لم يستطع الفيزيائيون النوويون أن يحصلوا على وصف بسيط للقوة النووية حتى بعد خمسين سنة من الدراسة.

ملخص للمعرفة الحالية

نستطيع أن نوجز فهمنا الحالي لقوالب البناء الأساسي للطبيعة برصد الكواركات والليبتونات ومجال الكوانتا للقوى الأساسية المعروفة التي تم جمعها في الجدول ٨-٣. نلاحظ أن الكواركات والليبتونات قد تم تقسيمها إلى عائلات، بدءًا بالجسيمات الأكثر ألفة أو التي تم اكتشافها أولًا ثم التحول إلى المكتشفة حديثًا. وأعضاء الكواركات للعائلة الأولى هم كواركات فوق وتحت، التي تستطيع وصف أغلب الجسيمات تحت النووية المألوفة، مثل البروتون والنيوترون. وأعضاء الليبتون في العائلة الأولى هم الإلكترون ومصاحبه النيوترينو. وأعضاء الكواركات في العائلة الثانية هي الكواركات الغريبة والمسحورة، وهي مطلوبة لتصف خصائص بعض الجسيمات الأكثر غرابة في ضيافة الجسيمات تحت النووية التي نتجت أثناء التفاعلات النووية ذات الطاقة العالية. وأعضاء الليبتون في العائلة الثانية هي الميون ومرافقه النيوترينو. ويعمل الميون مثل الإلكترون بشكل كبير لكنه يعادل تقريبًا مائتي مرة كتلة الإلكترون. والعائلة الثالثة بها كواركات القاع والقمة (أو الجمال والحقيقة)، المطلوبة لتفسير خصائص بعض الجسيمات الجديدة التي اكتشفت منذ سنة ١٩٧٧. وأعضاء الليبتون في العائلة الثالثة هم التاو ومرافقه النيوترينو. وقد اكتشف التاو سنة ١٩٧٥. وهو يعمل كإلكترون أثقل حتى من الميون. ولم يتم تمييز النيوترينو المصاحب إيجابيًّا.

وأخيرًا ندون كوانتا المجال للقوى الأساسية. وباتباع المناقشة في المقطع السابق فقد أحللنا القوة النووية القوية بقوة اللون القوية، حيث يطلق على مجال الكم الجليون gluon. ولم نتمكن تجريبيًّا فعلًا إلا من مشاهدة مجال الكوانتا للقوة الكهرومغناطيسية والقوة النووية الضعيفة. ويعتقد أن المجال الكمي لقوة اللون القوية الجليون، ذات كتلة ضخمة يتعذر الحصول عليها بواسطة معجلات الجسيمات الموجودة حاليًّا. وعلى الجانب الآخر، من المعتقد أن الجرافيتون يحمل قوة من الضعف بحيث يصعب مشاهدتها. وبالرغم من حقيقة أن اثنين فقط من مجالات الكوانتات

جدول ٨-٣: الجسيمات الأساسية (حوالي ١٩٨٦).

		ليبتونات		كواركات	
	الجسيمة	(إلكترون) e	(نيوترينو إلكترون) ν_e	فوق u	تحت d
أول عائلة	الشحنة*	١–	٠	٣/٢	٣/١–
	الكتلة**	٥, × ١٠$^{-٣}$	٠؟	~٥ × ١٠$^{-٣}$	~١ × ١٠$^{-٢}$
	اكتشف	١٨٩٨	١٩٥٤	١٩٦٣	١٩٦٣
	الجسيمة	(ميو) μ	(نيوترينو ميون) ν_μ	مسحور c	غريب s
العائلة الثانية	الشحنة	١–	٠	٣/٢	٣/١–
	الكتلة	,١١	٠؟	~١,٧	~,٣
	اكتشف	١٩٣٦	١٩٦٢	١٩٧٤	١٩٧٤
	الجسيمة	(تاو) τ	(تاو نيوترينو) ν_τ	(حقيقة أو القمة) t	(جمال أو قاع) b
العائلة الثالثة	الشحنة	١–	٠	٣/٢	٣/١–
	الكتلة	١,٧٨	٠؟	٣٠<	~٥
	اكتشف	١٩٧٥	؟	١٩٨٤	١٩٧٧

مجال الكوانتا

القوة	مجال الكم	الكتلة (GeV)	اكتشف
كهرومغناطيسية	فوتون (γ)	٠	١٩٠٥
ضعيفة	بوزون متجه وسيط $(W^{\pm}, Z^{0})$	٨١,١٠٠	١٩٨٣
(لون) قوية	جليون	؟	—
جاذبية	جرافيتون	٠	—

*الشحنات بوحدات شحنة البروتون.
**الكتلة بوحدات البليون إلكترون فولت (GeV).

الأربعة للقوى الأساسية قد تم مشاهدتها إلا أن وصف المجال-الكوانتات للقوى مقبول عالميًّا على أنه صحيح بواسطة الفيزياء الحديثة. وتعود القوى كلها إلى التبادل بين الجسيمات المتبادلة للكوانتات المعينة.



معمل فيرمي المعجل القومي.

ولنلاحظ احتمال وجود عائلات إضافية من الكواركات واللبتونات سيتم اكتشافها. وفي هذا الوقت يبدو أنه من الممكن أن يستمر عدد العائلات في النمو (بالرغم من أن اعتبارات معينة عن كيفية تطور العالم في اللحظات الأولى بعد الانفجار الكبير قد تضع حدًّا لعدد العائلات). ولاحظ أيضًا أن أغلب الجسيمات العادية في الكون مكونة من ليبتونات وكواركات العائلة الأولى فقط، وأنه في التفاعلات النووية عالية الطاقة جدًّا تنتج فقط جسيمات من كواركات من العائلات الأعلى. وهكذا وحتى لو وجدت عائلات أكثر، فهي نادرًا ما تكون متضمنة في الكون الذي نعرفه.

وبالرغم من أننا لا بد أن نتذكر أن الليبتونات والكواركات المدونة في الجدول ٨-٣ ترتبط كلها بجسيمات مضادة وأن كل كوارك يأتي بثلاثة ألوان، يجب أن نستخلص أنه إذا كانت هذه هي قوالب البناء الأساسية للطبيعة فالموقف غاية في البساطة — ليس قائمة طويلة تدعو إلى الإحباط لجسيمات تبدو غير مرتبطة. وهناك اعتبار آخر يجب أن نراعيه لكي ننتهي إلى أن هذه هي بالفعل قوالب البناء الأساسية. السؤال ببساطة «هل هناك أي دليل على أن اللبتونات أو الكواركات مكونة من شيء ما أصغر؟» ويمكن أن يُختزل السؤال إلى هل للجسيمة «حجم» أم لا. فإذا كان للجسيمة مدى مكاني (حجم)، فإن شيئًا ما لا بد أن يشغل ذلك المكان. وأيًّا كان هذا «الشيء» فإنه هو «ما تتكون منه» الجسيمة. إذا كانت الجسيمة نقطة فقط (أي لا حجم لها) يمكن أن تكون جسيمة أساسية (لاحظ أنه، بأي وضع، فتركيز مقدار

محدد من الشحنة في نقطة يبدو أنه يتطلب مقدارًا لا نهائيًّا من الطاقة وهذا ما سبب أن يظل هذا السؤال محل جدال إلى حد ما).

من المعروف أن الإلكترون صغير جدًّا. ويبدو أنه «نقطة» بحتة في الفراغ وليس له حجم يذكر. وبالرغم من ذلك فلم نستقر بعد على حدود حجم الكوارك على أنه في صغر الإلكترون، ويبدو أيضًا أنه مجرد نقطة جسيمة. ويمكن استخدام مبدأ عدم التيقن الذي ناقشناه في الفصل السابق؛ ليساعد في إقناع الفيزيائيين بأن وجود أي شيء أصغر داخل شيء صغير معروف وفي صغر الإلكترون أو الكوارك أمر بعيد الاحتمال. والأدلة التجريبية الحالية متسقة مع نموذج الإلكترون والكوارك تمامًا مثل الجسيمات التي لا بنية لها مع خواص «النقطة» الهندسية الأساسية التي تتدنى في الصغر إلى ١٠^{-١٦} سنتيمتر. وهكذا صار الفيزيائيون مقتنعين اقتناعًا متزايدًا أن الجدول ٨-٣ هو قائمة صحيحة لقوالب البناء الأساسية للطبيعة (بالرغم من وجود بعض التخمينات المتعلقة بالبنية داخل الكواركات).

وماذا بقي لنفهمه؟ أولًا مطلوب مزيد من الجهد ليكتمل التحقق من أن الليبتونات والكواركات أساسية. وعندئذ نحتاج أن نحدد بالضبط عدد العائلات الموجودة. وإذا كان عدد العائلات محدودًا، فلماذا؟ وختامًا يود الفيزيائيون أن يكتسبوا فهمًا أكبر للطبيعة الأساسية للقوى الأساسية الأربعة. ومن الممكن أن تقدم وصفًا أكثر للقوة الكهرومغناطيسية والقوة النووية الضعيفة في نفس الوقت، ويشعر بعض الفيزيائيين أن قوة اللون القوى ستندمج قريبًا في ذلك الوصف الموحد أيضًا. وسيترك ذلك فقط قوة الجاذبية لتتحد في نظرية مجال موحدة شاملة لكل القوى (هدفٌ عملَ في اتجاهه أينشتاين أكثر من أربعين عامًا). ويبدو أننا تقدمنا خطوات هائلة نحو الفهم الأساسي للطبيعة في العقود القليلة السابقة، لكن يتبقى الكثير.

وحتى من منطلق أوسع، قد يسأل المرء إذا ما كان الموضوع الأساسي لقوالب بناء الطبيعة قد انتهى بالجدول ٨-٣. وحتى بالرغم من أن هناك أدلة جيدة على أن الليبتونات والكواركات هي جسيمات «أساسية» بالفعل، وأن مبدأ هايزنبرج لعدم التيقن يشير إلى أنه من غير المحتمل أن هذه الجسيمات مكونة من جسيمات أصغر، فالمرء يميل إلى الاعتقاد أن الطبيعة ما زالت تحتوي على غرائب أكثر علينا اكتشافها. وهناك كثير من الفترات في التاريخ عندما اعتقد معظم العلماء أن العلم قد «اكتمل» تقريبًا. وقد أعقب تلك الفترات دائمًا ثورات علمية كانت من الأهمية بحيث غيرت فهمنا للكون الفيزيائي. ويبدو من غير المحتمل أننا قد وصلنا إلى نهاية هذه المهمة.

من الصعب أن نخمن أي اتجاهات يمكن أن تظهر في المستقبل، وعلى كل فلن تكون جديدة حقًّا إذا كنا نعلم من قبل في أي طريق نسير!

المراجع

١- مقدمة

Gillespie, Charles C. *The Edge of Objectivity.* Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1960. (A standard book on the history and philosophy of science.)

Holton, Gerald and Stephen G. Brush. *Introduction to Concepts and Theories in Physical Science,* 2nd ed. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1973. (A more mathematical book than this one, but with extensive discussion on the nature of scientific thought and the like and with extensive bibliographies. Chapters 3, 12, 13, and 14 are pertinent to this chapter.)

Jaki, Stanley L. *The Relevance of Physics.* Chicago: University of Chicago Press, 1966.
History and philosophy of science, and the effect of science on other areas of thought.

Kuhn, Thomas S. *The Structure of Scientific Revolutions,* 2nd ed. Chicago: University of Chicago Press, 1970. (This book has had a great impact on the way in which people think about "scientific revolutions.")

Schneer, Cecil J. *The Evolution of Physical Science.* New York: Grove, 1964. (An interesting historical perspective of the development of physical science. Especially good discussions of the early Greek contributions.)

٢- علم الفلك الكوبرنيكي

Abbott, E. A. *Flatland,* New York: Dover, 1952.
A very entertaining book, originally written a century ago, about a two-dimensional world.

Berry, Arthur. *A Short History of Astronomy: From Earliest Times Through the Nineteenth Century.* New York: Dover, 1961.

Chapter II discusses the contributions of the Greeks.

Bronowski, J. *The Ascent of Man.* Boston: Little, Brown, 1973.

Based on a television series of the same name. Chapters 5, 6, and 7 are pertinent to this chapter.

Butterfield, Herbert. *The Origins of Modern Science,* rev. ed. New York: Free Press, 1965.

A brief book, written by a historian, which discusses scientific developments up to the time of Isaac Newton.

Cornford, F. M. *The Republic of Plato.* London: Oxford University Press, 1941.

An account of Plato's Allegory of the Cave is found here.

Dreyer, J. L. E. *A History of Astronomy from Thales to Kepler,* 2nd ed. New York: Dover, 1953.

Provides a fairly detailed account of the subject matter of this chapter.

Holton, Gerald and Stephen G. Brush. *Introduction to Concepts and Theories in Physical Science,* 2nd ed. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1973.

An introductory text with major emphasis on the historical background of physics. Chapters 1 through 5 and pp. 154-160 are pertinent, with many references to other sources of information.

Kearney, Hugh. *Science and Change, 1500-1700.* New York: McGraw-Hill, 1971.

A small book that discusses the general scientific ferment in Europe during the period 1500 to 1700.

Koestler, Arthur. *The Watershed.* Garden City, N.Y.: Doubleday, 1960.

A slim biographical discussion of Kepler's life and work.

Koyre, Alexander. *Discovering Plato.* New York: Columbia University Press, 1945.

This book discusses Plato's views about science and philosophy.

Kuhn, Thomas S. *The Copernican Revolution.* New York: Random House, 1957.

A detailed discussion of the subject of this chapter.

Kuhn, Thomas S. *The Structure of Scientific Revolutions,* 2nd ed. Chicago: University of Chicago Press, 1970.

See comment in references for Chapter 1.

Schneer, Cecil J. *The Evolution of Physical Science.* New York: Grove, 1964.

See comment in references for Chapter 1.

Toulmin, Stephen and June Goodfield. *The Fabric of the Heavens.* New York: Harper & Row, 1961.
An interesting account of the evolution of scientific viewpoints and ideas from the time of the Babylonians to the time of Isaac Newton.

٣- ميكانيكا نيوتن والسببية

Butterfield, Herbert. *The Origins of Modern Science.* New York: Free Press, 1957.
An introduction to the historical background of classical physics. Does not discuss "modern" physics.

Holton, Gerald and Stephen G. Brush. *Introduction to Concepts and Theories in Physical Science,* 2nd ed. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1973.
See comment in references for Chapter 2. Chapters 6 through 11 are particularly pertinent for this chapter.

Schneer, Cecil J. *The Evolution of Physical Science.* New York: Grove, 1964.
See comment in references for Chapter 1.

٤- مفهوم الطاقة

Brown, Sanborn C. *Benjamin Thompson, Count Rumford.* Cambridge, Mass.: MIT Press, 1979.
A personal and scientific biography of one of the first American scientists.

Feynman, Richard P., Robert B. Leighton, and Matthew Sands. *The Feynman Lectures on Physics.* Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1963, Vol. 1, Chap. 4.
A more advanced undergraduate textbook with emphasis on understanding the physical principles involved. Uses elementary calculus.

Holton, Gerald and Stephen G. Brush. *Introduction to Concepts and Theories in Physical Science,* 2nd ed. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1973.
Chapters 15-17, 22. See comment in references for Chapter 2.

Mott-Smith, Morton. *The Concept of Energy Simply Explained.* New York: Dover, 1964.
A reprint of a very interesting book, originally published in 1934 and written in a descriptive style for the general public. Some of its assertions are not acceptable today.

Schneer, Cecil J. *The Evolution of Physical Science.* New York: Grove, 1964.
See comment in references for Chapter 2.

٥- الإنتروبيا والاحتمالية

Adams, Henry. *The Degradation of the Democratic Dogma.* New York: Macmillan, 1920.
This book typifies the impact of "heat death" on social thinking.

Arnhem, Rudolph. *Entropy and Art: An Essay on Disorder and Order.* Berkeley: University of California Press, 1971.
Contrasts what should be the artist's view of these subjects with the physicist's view.

Gamow, George. *Mr. Tompkins in Paperback.* New York: Cambridge University Press, 1972, Chap. 9. See comment in references for Chapter 6.

Georgescu-Roegen, Nicholas. *The Entropy Law and the Economic Process.* Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1971.
Attempts a mathematical analysis of economic theory, employing general physics concepts from thermodynamics and quantum theory.

Gillispie, Charles C. *The Edge of Objectivity.* Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1960, pp. 400-405.
See comment in references for Chapter 1.

Holton, Gerald and Stephen G. Brush. *Introduction to Concepts and Theories in Physical Science,* 2nd ed. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1973, Chap. 18.
See comment in references for Chapter 1.

Landsberg, Peter Theodore. *Entropy and the Unity of Knowledge.* Cardiff: University of Wales Press, 1961.
Applications of entropy concept to economic theory, information theory, textual analysis.

Lewicki, Zbigniew. *The Bang and the Whimper: Apocalypse and Entropy in American Literature.* Westport, Conn.: Greenwood Press, 1984.
The latter half of this book discusses the entropy concept as employed by various American writers, including Herman Melville, Nathaniel West, Thomas Pynchon, William Gaddis, Susan Sontag, and John Updike.

Mott-Smith, Morton. *The Concept of Energy Simply Explained.* New York: Dover, 1964.
See comment in references for Chapter 4.

Powell, J. R., F. J. Salzano, Wen-Shi Yu, and J. S. Milau. "A High Efficiency Power Cycle in Which Hydrogen is Compressed by Absorption in Metal Hydrides." *Science* 193 (23 July 1976), 314-316.
Describes a three-reservoir heat engine.

Rifkin, Jeremy. *Entropy: A New World View.* New York: Viking, 1980.
Contends that economic and energy policy must be greatly revised to take account of the second law of thermodynamics.

Sandfort, John F. *Heat Engines.* Garden City, N.Y.: Doubleday, 1962.
An introductory, essentially nonmathematical discussion of heat engines, written for the general public.

Zemansky, Mark W. *Temperatures Very Low and Very High.* Princeton, N.J.: Van Nostrand, 1964. (An introductory discussion at the college level; assumes some knowledge of physics.)

٦- النسبية

Bondi, Hermann. *Relativity and Common Sense.* New York: Dover, 1980.
An introductory, essentially nonmathematical discussion of relativity, written for the general public.

Born, Max. *Einstein's Theory of Relativity.* New York: Dover, 1962.
A thorough discussion, using only algebra and simple geometry, of mechanics, optics, and electrodynamics as involved in relativity theory.

Casper, Barry M. and Richard J. Noer. *Revolutions in Physics.* New York: Norton, 1972.
Chapters 12-15 provide a good low-level discussion of relativity using very simple mathematics.

Ford, Kenneth W. *Basic Physics.* New York: Wiley, 1968.
A physics textbook that uses only algebra and trigonometry, with good discussion. See Chapters 1, 4, 15, 16 and 19-22.

Gamow, G. W. *Mr. Tompkins in Paperback.* New York: Cambridge University Press, 1971.
A delightful book presenting the ideas of modern physics as distorted in the dreams of a bank clerk dozing during lectures. Chapters 1-6 deal with relativity. See footnote on p. 171 of this book for a qualification.

Hawking, S. W. "The Edge of Spacetime." *The American Scientist,* 72 (July-August 1984) 355-359.
An interesting discussion of some recent ideas in general relativity, especially concerning the application of ideas of quantum theory (the subject of Chapter 7 of this book).

Holton, Gerald and Stephen G. Brush. *Introduction to Concepts and Theories in Physical Science.* Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1973, Chap. 31.
See comment in references for Chapter 1.

Lindsay, Robert Bruce and Henry Margenau. *Foundations of Physics.* New York: Wiley, 1936.
An advanced textbook with discussions of basic metaphysical assumptions in physics. See Chapters 1, 2, 7 and 8.
Resnick, Robert. "Misconceptions About Einstein." *Journal of Chemical Education* 57 (December 1980) 854-862.
Contains interesting biographical information.
Sciama, D. W. *The Physical Foundations of General Relativity.* Garden City, N.Y.: Doubleday, 1969.
Written for the general public but contains rather sophisticated, subtle discussions.

٧- النظرية الكمية ونهاية السببية

DeWitt, Bryce S. and R. Neill Graham. "Resource Letter IQM-1 on the Interpretation of Quantum Mechanics." *American Journal of Physics* 39 (July 1971) 724-738.
Feynman, Richard P., Robert B. Leighton, and Matthew Sands. *The Feynman Lectures on Physics.* Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1965, Vol. iii. (See comment in references for Chapter 4.)
Ford, Kenneth W. *Basic Physics.* New York: Wiley, 1968. Chaps. 23 and 24. See comment in references for Chapter 6.
Gamow, G. W. *Mr. Tompkins in Paperback.* New York: Cambridge University Press, 1971. Chaps. 7, 8, 10, and 10 1/2.
See comment in references for Chapter 6.
Friedman, A. J. and Carol Donley. *Einstein as Myth and Muse.* Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
Friedman, Alan J. "Contemporary American Physics Fiction." *American Journal of Physics* 47 (May 1979) 392-395.
Hoffman, Banesh. *The Strange Story of the Quantum.* New York: Dover, 1959.
An introductory, essentially nonmathematical discussion of quantum mechanics, written for the general public.
Heisenberg, Werner. *Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science.* New York: Harper, 1958.
Presents the philosophical viewpoint of one of the great architects of the quantum theory.
Holton, Gerald and Stephen G. Brush. *Introduction to Concepts and Theories in Physical Science,* 2nd ed. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1965. Chaps. 26, 28, and 29.
See comment in references for Chapter 1.

Juki, Stanley L. *The Relevance of Physics.* Chicago: University of Chicago Press, 1966.
See comment in references for Chapter 1.
Lindsay, Robert Bruce and Henry Margenau. *Foundations of Physics.* New York: Wiley, 1936.
See comment in references for Chapter 6.

٨- مبادئ الحفاظ والتماثلات

Cohen, B. L. *Concepts of Nuclear Physics.* New York: McGraw-Hill, 1971.
An advanced undergraduate text on introductory nuclear physics.
Eisberg, R. and R. Resnick. *Quantum Physics.* New York: Wiley, 1974.
A less advanced undergraduate text with good introductions to the basic ideas of modern physics, including nuclear physics.
Enge, H. A. *Introduction to Nuclear Physics.* Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1966.
Another well-written advanced undergraduate text.
Gamow, G. W. *Mr. Tompkins in Paperback.* New York: Cambridge University Press, 1971, Chaps. 12-15.
See comment in references for Chapter 6.
Particles and Fields. San Francisco: Freeman, 1980.
A series of reprints from *Scientific American* on recent advances in the subject of elementary- particle physics, written for the interested general public. See also various articles in *Scientific American* written since 1980.

أفكار سبع هزت العالم

هل للعالم كيان ملموس ندركه بحواسنا أم أن كل الأشياء نسبية؟ هل تخضع المادة والزمن والفضاء للتغير أم تظل ثابتة في جميع أرجاء الكون؟ هل هناك دائمًا علاقة تربط بين المسببات والنتائج أم أن بعض الأشياء تحدث من تلقاء نفسها؟ لقد صاغ العلم أفكارنا الأساسية عن العالم، ولكن خروج هذه الاكتشافات إلى النور لم يكن ليمر دون صعوبات. يسلط هذا الكتاب الضوء على سبعة من أهم الأفكار في مجال الفيزياء - الأفكار التي حطمت ما كان يسلم به المذهبيون والفلاسفة والعلماء - ويشرحها بأسلوب يجمع بين البساطة والإمتاع.

ولا يحتاج القارئ إلى معرفة بالرياضيات أو العلوم حتى يستمتع بهذا الكتاب الرائع. يبحث الكتاب في تاريخ سبعة من أهم الموضوعات في علم الفيزياء وهي: علم الفلك عند كوبرنيكس، والميكانيكا عند نيوتون، والطاقة والإنتروبيا، والنسبية، ونظرية الكم، والتماثل، وقوانين بقاء المادة والطاقة، وهذه الاكتشافات مجتمعة هي القاعدة لفهم العالم الذي نحيا فيه. ويشرح المؤلفان نيثان سبيلبرج وبريون أندرسون كلًّا من هذه المفاهيم بأسلوب قصصي يتسم بالسهولة والبعد عن التعقيد، آخذين في الاعتبار الإطار الزمني لكل منها، ثم يقيِّمان تأثير كل منها في صياغة فهمنا للزمن والمكان والمادة، بل الوجود ذاته. يجسد كتاب «أفكار سبع هزت العالم» الاكتشافات العلمية لمحبي العلوم والمتطلعين إلى المعرفة.

٣٢٤ صفحة

ISBN 978-977-6263-56-7





http://www.kalimatarabia.com